

Resumen

Los fuegos accidentales en edificios industriales es un tema muy importante en la ingeniería de la seguridad. Un mejor conocimiento de este fenómeno es necesario para llegar a nuevas soluciones en la lucha contra incendios.

Este proyecto, después de exponer la teoría fundamental de los incendios en recintos industriales, se centra en la determinación del campo de temperaturas en un edificio durante un incendio. La temperatura alcanzada en las diferentes zonas es de una importancia vital a la hora de determinar los efectos de este fenómeno sobre la estructura. Dado que el fuego es un fenómeno destructivo, es imposible hacer pruebas reales para predecir el comportamiento de un edificio en todas sus configuraciones posibles. Existen varios modelos, analíticos y numéricos, que permiten estimar la evolución del campo de temperaturas en el edificio. Después de presentar las herramientas disponibles, su teoría y su campo de aplicación, el objetivo de estudio será aplicar varios métodos de simulación a un caso real. El estudio se basa en dos modelos numéricos: Ozone, un modelo por zonas y Fire Dynamic Simulator (FDS) un modelo de mecánica de fluidos computacional. Los resultados son curvas de temperatura en el edificio obtenidas para diferentes escenarios reales y un análisis de la importancia de cada parámetro (velocidad de liberación de calor, nivel de riesgo intrínseco, localización de la carga...) en el desarrollo de los fuegos.





INDICE

RESUMEN	1
INDICE	3
GLOSARIO	6
PREFACIO	9
1 INTRODUCCIÓN	11
1.1 Objetivos del proyecto	11
1.2 Alcance del proyecto	11
2 ELEMENTOS FUNDAMENTALES DEL FUEGO EN EDIFICIOS.	13
2.1 Introducción	13
2.2 El fuego real	13
2.2.1 Fases del desarrollo	13
2.2.2 Física y química del fuego	14
2.3 Elementos del incendio	15
2.3.1 Carga de fuego	15
2.3.2 Ignición	16
2.3.3 Generación de calor: RHR	16
2.3.4 Flash-Over	19
2.3.5 Ventilación	19
3 DISEÑO Y CÁLCULO DE UN FUEGO NATURAL	21
3.1 Escenarios de incendio de cálculo	21
3.1.1 Características del edificio	21
3.1.2 Carga de fuego	22
3.1.3 Características de los ocupantes	24
3.1.4 Selección de escenarios de incendio de cálculo	24
3.2 Fuego de cálculo	24
3.2.1 Método "Natural Fire Safety Concept"	25
3.2.2 Criterios para la modelización, una o dos zonas?	27
3.2.3 Clasificación de los escenarios	30
4 PRINCIPALES HERRAMIENTAS PARA EL ANÁLISIS DE INCENDIOS REALES	32
4.1 Modelos analíticos	32



4.1.1	Curvas de fuegos nominales	32
4.1.2	Curvas paramétricas tiempo-temperatura.....	33
4.2	Modelos numéricos.....	36
4.2.1	Modelos por zonas	37
4.2.2	Ozone.....	38
4.2.3	Modelos de mecánica de fluidos computacional	44
4.2.4	FDS, “Fire Dynamics Simulator”	45
5	ESTUDIO DE UN CASO CONCRETO, LA NAVE TIPO.....	51
5.1	Presentación del edificio.....	51
5.1.1	Propiedades geométricas	52
5.1.2	Propiedades térmicas	52
5.2	Propuestas de escenarios de incendio.....	53
5.2.1	Propuestas de distribución en planta.....	53
5.2.2	Escenarios de incendio.....	56
5.2.3	Calibración de los programas	59
5.3	Análisis del caso de la nave TIPO.....	64
5.3.1	Influencia del RHR_{maxi}	65
5.3.2	Influencia de las oberturas; escenarios para la obertura de la puerta.....	67
5.3.3	Influencia del nivel de riesgo intrínseco.....	71
5.3.4	Influencia de la repartición de la carga de fuego.....	72
5.3.5	Zonas de temperatura máxima.....	74
5.3.6	Análisis global de los resultados	77
	CONCLUSIONES	79
	AGRADECIMIENTOS	81
	BIBLIOGRAFÍA	82
	Referencias bibliográficas.....	82
	Bibliografía complementaria	83
	ANEXO A	85
	Curvas paramétricas.....	85
	ANEXO B	94
	Informes de simulaciones Ozone V2.....	94
	ANEXO C	100
	Archivos FDS .Data y . Out.....	100





Glosario

A_{cf}	[m ²]	Superficie ocupada por la carga de fuego
A_f	[m ²]	Superficie del fuego
A_{lim}	[m ²]	Superficie total de los límites del compartimiento (paredes + suelo + techo)
A_{tot}	[m ²]	Superficie total del suelo
A_w	[m ²]	Superficie total de las aperturas verticales
b	[J/m ² ·s ^{1/2} ·K]	Inercia termica
C_p	[J/kg·K]	Calor específico
E	[Energía interna
g	[m/s ⁻²]	Constante de gravitación
h	[m]	Altura
h_{cf}	[m]	Altura del combustible
h_w	[m]	Altura media de las aberturas verticales
H	[MJ]	Calor de combustión
H_c	[MJ/kg]	Energía calorífica liberada por unidad másica de combustible
m	[-]	Factor de eficacia de combustión
\dot{m}	[kg/s]	Velocidad de pirolisis
M	[kg]	Masa
O	[m ^{1/2}]	Factor de aberturas
p	[MPa]	Presión
q	[MJ/m ²]	Densidad de carga de fuego
Q	[MJ]	Carga de fuego
R		Constante universal de los gases
RHR	[MW]	Velocidad de liberación de calor (Rate of Heat Released)
RHR_{maxi}	[MW/m ²]	Velocidad de liberación de calor máxima por unidad de superficie de carga de fuego
t	[s], [min]	Tiempo
t_a	[s]	Constante de tiempo



t^*	[horas]	Tiempo paramétrico
T	[°C]	Temperatura
T_{ign}	[°C]	Temperatura de ignición del combustible
T_{fl}	[°C]	Temperatura de aparición del flash-over
V	[m ^{1/2}]	Factor de oberturas
Z_s	[m]	Altura de la interfase entre la zona caliente y la zona fría

Subíndices

$\bar{\tau}_{cf}$	Relativo a la carga de fuego
$\bar{\tau}_d$	Valor de diseño
$\bar{\tau}_{eff}$	Valor efectivo
$\bar{\tau}_f$	Relativo al fuego
$\bar{\tau}_{ign}$	Relativo a la ignición
$\bar{\tau}_L$	Relativo a la capa inferior
$\bar{\tau}_{lim}$	Valor límite
$\bar{\tau}_{max}$	Valor máximo
$\bar{\tau}_{min}$	Valor mínimo
$\bar{\tau}_{net}$	Valor neto
$\bar{\tau}_{tot}$	Relativo a la superficie total del suelo
$\bar{\tau}_U$	Relativo a la capa superior
$\bar{\tau}_w$	Relativo a las aberturas verticales

Letras griegas

ρ	[kg/m ³]	Densidad
λ	[W/m·K]	Conductividad térmica
Ψ	[-]	Coefficiente de caracterización de las cargas protegidas
d	[-]	Coefficiente de corrección de carga de fuego
Θ_g	[°C]	Temperatura de los gases en el compartimiento



Prefacio

Origen del proyecto

Este proyecto fue propuesto por el profesor Frederic Marimon del laboratorio de Resistencia de Materiales e Ingeniería de las Estructuras. El objetivo inicial del proyecto, fue la determinación del comportamiento de la estructura de una nave industrial frente a un incendio real. Se ha dividido en dos temas distintos, tratados en dos proyecto finales de carrera. Este proyecto se centra en la determinación del campo de temperatura producido por un incendio real.

Motivación

Este proyecto de fin de carrera constituye la última etapa de mi programa de doble titulación, bajo la convención firmada entre la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona y el departamento de “Génie Mécanique Conception” del Instituto Nacional de Ciencias Aplicadas de Lyon. En Lyon mi formación académica fue sobre todo orientada en el tema de la mecánica general aplicada al diseño de máquinas. En Barcelona, quería disfrutar de la posibilidad de alargar mi campo de conocimientos y me matriculé en varias asignaturas de construcción, arquitectura industrial y estructuras metálicas. El tema de este proyecto incluye también mucha teoría térmica, que es otro tema que me motiva.

Utilizando modelos numéricos avanzados de simulación de incendios reales, este proyecto se sitúa en un campo de la ingeniería de la seguridad bastante reciente y en plena expansión. Este proyecto es una investigación real y innovadora, que utiliza nuevas herramientas.



1 Introducción

1.1 Objetivos del proyecto

El objetivo de este proyecto es de determinar los campos de temperaturas dentro de una nave industrial, sometida a varios escenarios de incendios reales. Se trata de identificar, analizar y entender los parámetros que influyen en las fases del desarrollo de un incendio, y después modelizarlos. La confrontación y el análisis de los resultados obtenidos con diferentes modelos y para diferentes escenarios permitirán una caracterización completa del campo de temperatura y de su evolución.

1.2 Alcance del proyecto

De momento, la mayoría de los códigos de cálculo y de los reglamentos utilizan las curvas ISO de fuegos nominales como referencia. La principal limitación de la utilización de estos fuegos nominales es que solo dependen del tiempo, sin tener en cuenta ningún otro parámetro. Un incendio real, es decir un fuego que se desarrolla en un edificio, es un fenómeno bastante complejo y depende de muchos parámetros, principalmente de las características del combustible y del recinto. Después de analizar el desarrollo de un fuego real y de identificar los parámetros más influyentes, se plantearán los conceptos de base en el diseño de los escenarios de incendios reales. Este análisis está seguido por una presentación de las diferentes herramientas existentes para modelizar los incendios, de sus campos de aplicaciones y de sus limitaciones. Finalmente, el desarrollo del proyecto acaba con la aplicación de estos métodos de simulación a un caso real, con finalidad de determinar los posibles campos de temperatura en el recinto según el escenario de fuego real aplicado.



2 Elementos fundamentales del fuego en edificios.

2.1 Introducción

Un fuego real en un edificio es un fenómeno muy complejo. Antes de todo, para simular un incendio real, es necesario conocer y entender los fenómenos y los parámetros que influyen en su desarrollo dentro de un edificio. En este capítulo se describen y se explican los conceptos y parámetros principales que sirven para la comprensión del incendio y su análisis.

2.2 El fuego real

El fuego es una reacción química exotérmica que puede ocurrir con la reunión de tres elementos: un combustible, oxígeno y una fuente de calor. Las condiciones de existencia del fuego son las siguientes:

- Bastante oxígeno para permitir la combustión
- Bastante calor para que el combustible alcance su temperatura de ignición
- La presencia de un material combustible

Si falta uno de estos elementos, el fuego se apaga.

2.2.1 Fases del desarrollo

El desarrollo del fuego, una vez estos elementos reunidos, se hace siguiendo estas fases:

1- la fase de ignición, que marca el inicio del fuego.

2- la fase de propagación o crecimiento. Durante esta fase, el combustible se quema creando gases calientes. Estos gases forman un penacho de humo y suben hasta el techo, dividiendo el compartimiento en dos zonas:

Una zona alta de humos calientes, y una zona baja, fría y clara de gases de combustión.

Esta situación puede después evolucionar de dos maneras diferentes:



- La zona caliente va creciendo y su temperatura aumentando hasta la desaparición de la zona fría. En este caso la temperatura se considera como homogénea en todo el recinto y causa la ignición de la totalidad del combustible presente en el compartimiento. Este fenómeno se llama flash-over o fuego totalmente desarrollado.
- La aumentación de temperatura es demasiado lenta para llegar al flash-over, porque la propagación es muy lenta o porque no hay más combustible, y el fuego queda localizado.

3- Después esta de esta fase de crecimiento, el fuego esta desarrollado y quema con una liberación de calor constante.

4- la última fase es el decrecimiento o enfriamiento. Durante esta fase la temperatura puede seguir siendo bastante elevada y afectar a la estructura.

2.2.2 Física y química del fuego

Durante su fase de pre-flash-over, el fuego puede representarse con este esquema simplificado, extracto de la “Guía de diseño para la seguridad ante incendio en edificios industriales” [1]:

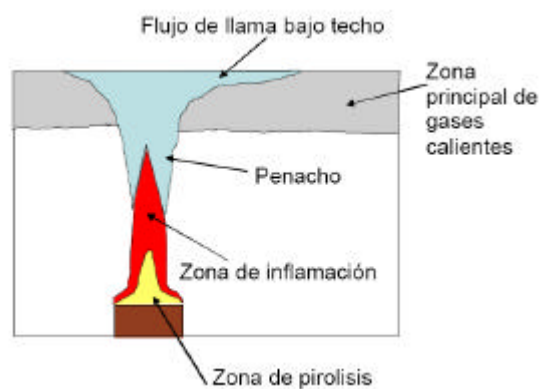


Figura 2-1 : Elementos principales de un fuego real

En cada zona tiene lugar un fenómeno interdependiente con los otros.

El flujo de calor de la llama y del entorno inmediato del fuego da lugar a la descomposición y/o evaporación del combustible sólido, produciendo gases combustibles. Este fenómeno se llama pirolisis. La reacción de estos gases con el oxígeno produce gases de combustión y calor. Este calor permite sostener el fenómeno. La llama ocupa la zona



donde el combustible gaseoso y el oxígeno están mezclados. Los productos de combustión, es decir humos, forman un penacho y suben hasta el techo.

El calor de combustión, H_c , es la energía liberada por este proceso por una unidad másica de combustible. $H_{c,net}$ es la cantidad total de energía que puede liberar el combustible, considerando una combustión completa, para ejemplo en calorímetro bajo alta presión y en presencia de oxígeno puro. En fuegos reales, la energía liberada es mas baja, dado que no todo el combustible se quema. El calor de combustión efectivo es el ratio entre el flujo de calor liberado y el ratio de pirolisis.

$$H_{c,eff}(t) = \frac{RHR(t)}{\dot{m}(t)} \quad [MJ/kg] \quad (E2-1)$$

La eficacia de la combustión se representa con el factor m :

$$m(t) = \frac{H_{c,eff}(t)}{H_{c,net}} \quad [-] \quad (E2-2)$$

La velocidad de pirolisis $\dot{m}(t)$ representa la cantidad de combustible sólido que se transforma en combustible gaseoso por segundo, en [kg/s]. Es también el ratio de perdida de masa del combustible. La ecuación (E2-1) solamente es valida cuando el oxígeno no limita la combustión. Es muy común de encontrar “velocidad de combustión” como sinónimo de velocidad de pirolisis, pero en condiciones de baja ventilación estas dos velocidades pueden no ser iguales.

Cuando un fuego se desarrolla en un edificio industrial, las fases de su desarrollo son controladas por diferentes parámetros dados por el entorno del fuego.

2.3 Elementos del incendio

2.3.1 Carga de fuego

La carga de fuego en un sector de incendio está definida como la energía total cedida en caso de incendio. Parte de esta energía sirve en calentar el recinto y el resto se pierde por las aperturas. Esta carga de fuego esta constituida por el conjunto de todos los objetos posiblemente combustibles presentes en el recinto. La carga de fuego se expresa en Julios, se obtiene sumando el producto del calor de combustión $H_{c,i}$ por la masa M_i de



cada producto. En algunos casos se utiliza la masa equivalente de madera, es decir la masa de madera que liberaría la misma energía que esta carga de fuego.

Dividida por el área del suelo del recinto la carga de fuego nos da la densidad de carga de fuego.

2.3.2 Ignición

La prevención de los riesgos de ignición es uno de los campos más importante de la lucha contra incendios. La ignición requiere la reunión de tres elementos que son: combustible inflamable, calor de ignición y oxígeno. El riesgo de ignición depende de los materiales presentes en el edificio, así que de los procesos y actividades teniendo lugar en este. Se trata minimizar el potencial de ignición y así el riesgo de incendio –sin ignición, no incendio-. A la hora de evaluar el potencial de ignición, no existen métodos cuantitativos para predecir este peligro y se utilizan métodos probabilísticos.

En este estudio se considera que la ignición ha tenido lugar y por tanto se analizan los fuegos después de esta fase. El proyecto de valorización “Concepto de seguridad frente a Incendio Real” [2] presenta una información más completa sobre este tema.

2.3.3 Generación de calor: RHR

Una vez determinada la carga de fuego, es decir la energía total potencialmente cedida por el incendio, hay que determinar como se libera esta energía. La curva de generación de calor, RHR, del inglés Heat Release Rate, representa la potencia del fuego en función del tiempo.

En la figura [2-2] se ven tres curvas de generación de calor correspondiente a la misma carga de fuego, dado que la superficie bajo curva en ambas es la misma.

Este parámetro es seguramente el más importante para describir un fuego. El RHR influye mucho en la fase de crecimiento del fuego, controlando en una cierta medida fenómenos como el tamaño de la zona de pirolisis, el flujo de gases caliente o la temperatura de la zona caliente...El RHR depende sobre todo del tipo y de la cantidad de combustible, de la cantidad de oxígeno disponible, pero también de muchos otros factores como el tamaño del recinto y las propiedades térmicas de sus límites.

La única manera de estimar el RHR es la experimentación. Existen dos técnicas principales, una por pérdida de masa del combustible, y otra por depleción de oxígeno. La segunda, más moderna, permite alcanzar resultados de una buena exactitud. Esta técnica consiste en medir la concentración de oxígeno en los gases de combustión, lo que



permite deducir la cantidad de oxígeno quemado. Esta cantidad multiplicada por el calor de combustión del oxígeno da el valor del RHR.

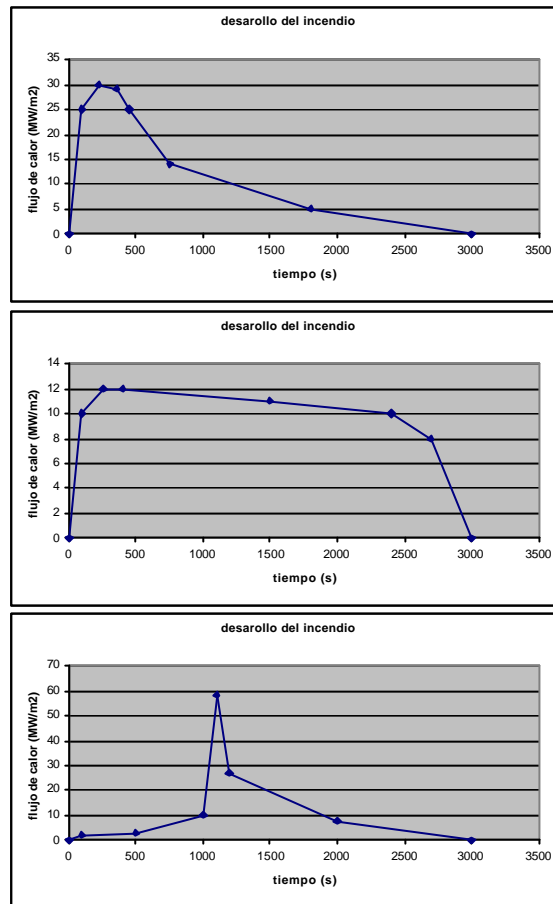


Figura 2-2 : 3 curvas de liberación de calor correspondiente a la misma carga de fuego.

Muchos experimentos de este tipo han sido realizados por varios laboratorios europeos o americanos. Los resultados de sus estudios son disponibles en varias bases de datos. Un límite muy importante es el tipo de productos presentados en los tests: son por la mayoría elementos que se encuentran en viviendas o habitaciones de hotel como sillones, sillas, sofás o televisiones. Algunos estudios presentan resultados sobre coches o varios vehículos.

La base de datos del laboratorio sueco SP Swedish National Testing and Research Institute [3] y especialmente el trabajo del profesor Sundström, son un ejemplo del tipo de informaciones que se pueden encontrar. Las figuras 2-3 y 2-4, extraídas de la tesis de JF Cadorin [4] ilustran esto ensayos.





Figura 2-3 : Foto de un test de combustión de un sofá (Sundström, 1997)

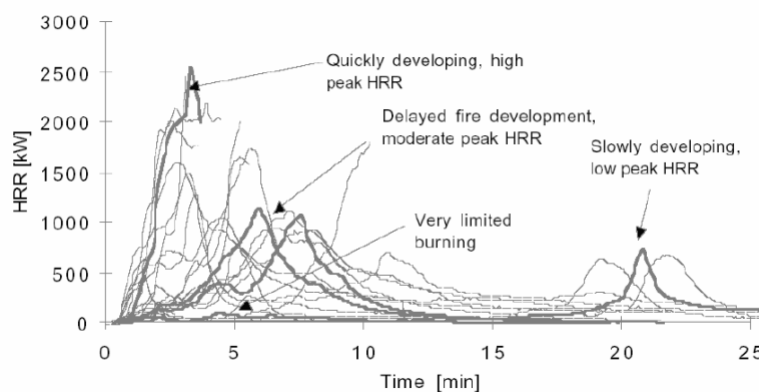


Figura 2-4 : Cuatro tendencias de liberación de calor determinadas por una serie de 27 ensayos reales (Sundström, 1997)

Con un grande número de pruebas sobre varios muebles, Sundström define cuatro categorías principales de comportamiento al fuego de estos objetos. El flujo de calor depende también de la fuente de ignición y del recinto donde se realizan las pruebas, hay que utilizar estos datos con cuidado. Se nota para ejemplo que todas estas pruebas se han realizado en condiciones de combustión libre, es decir sin considerar ninguna influencia del recinto, como si estaba quemando fuera. Estudiando un incendio dentro de un edificio, hay que considerar factores como la temperatura ambiente o la aportación de oxígeno que influyen mucho. En general, una misma carga de fuego se quema mas rápidamente a dentro porque el fuego aprovecha el calor aportado por la capa de humos calientes.

Los resultados experimentales obtenidos por varios productos no permiten determinar, de manera sencilla y precisa, la generación de calor producida por el incendio de una nave industrial conteniendo una gran variedad de productos. Por eso el proyecto “Natural Fire Safety Concept” (Concepto de Seguridad frente a un Fuego Real) propone un método



para determinar esta curva de manera sencilla y razonable. Este método será detallado mas adelante en el capítulo 3.1.2

2.3.4 Flash-Over

El Flash-over es la transición entre un fuego localizado y la generalización del fuego a todas las superficies combustibles presentes en el recinto. Este fenómeno ocurre cuando la temperatura en el recinto alcanza la temperatura de ignición del combustible. El RHR alcanza de manera casi instantánea su valor máximo, la temperatura sube también de golpe y esta homogénea en todo el recinto. Es de primera importancia conocer y ser capaz de prever este fenómeno, ya que cuando ocurre, las oportunidades de sobrevivir son casi nulas. Es también cuando ocurre el flash-over que los daños sobre la estructura son los más importantes.

Muchas pruebas han sido realizadas y han permitido determinar cuales son los parámetros que controlan este fenómeno y algunas formulas empíricas para prever si iba a ocurrir o no. Los dos parámetros más importantes más influyentes son la temperatura y el flujo de calor recibido por el combustible todavía no quemando. Se admite como valor indicativa de referencia para llegar al flash-over una temperatura de 600° y un flujo de calor recibido de 20kW.

2.3.5 Ventilación

La ventilación, que provee el oxígeno, constituye un parámetro muy importante:

En la fase de ignición, el oxígeno esta disponible y la evolución depende sobre todo del combustible y de la fuente de calor inicial. Después hay dos posibilidades:

- Si hay bastante oxígeno, el fuego esta controlado por el combustible
- Si no, el fuego esta controlado por el oxígeno que entra en el recinto mediante las aperturas.

La transición entre estos dos fenómenos está bastante floja. Harmathy propone la correlación siguiente:

$$\text{Controlado por ventilación si } \frac{\mathbf{r}_a \cdot g^{1/2} A_w \sqrt{h_w}}{A_f} < 0.235 \quad (\text{E2-3})$$

$$\text{Controlado por combustible si } \frac{\mathbf{r}_a \cdot g^{1/2} A_w \sqrt{h_w}}{A_f} < 0.235 \quad (\text{E2-5})$$



Donde:

- ρ_a es la densidad del aire
- g la constante de gravitación
- A_w la superficie total de las aperturas verticales
- h_w la altura media de la aperturas verticales
- A_f la superficie de la zona de fuego

El factor $V = A_w \sqrt{h_w}$ se llama factor de apertura, se encuentra en muchos modelos de cálculo o correlaciones.



3 Diseño y cálculo de un fuego natural

Como se ha visto en el capítulo 2, el fuego es un fenómeno muy complejo pendiente de una grande variedad de parámetros. La especificación de un escenario de incendio real apropiado y realista es un aspecto crucial en este estudio. En la mayoría de los edificios industriales, el número de escenarios posibles es casi infinito y se necesita reducirlo, hasta llegar a un escenario único representando el caso más desfavorable referido a los riesgos reales presentes en el edificio.

3.1 Escenarios de incendio de cálculo

3.1.1 Características del edificio

La primera fase de la determinación de un escenario de incendio consiste en coleccionar informaciones sobre el edificio. Es importante conocer la distribución en planta y la geometría del edificio incluyendo sus dimensiones exteriores y la subdivisión en compartimientos o recintos y las dimensiones de estos compartimientos. Para el análisis estructural deberán señalarse los materiales empleados en la construcción de los elementos estructurales y límites del recinto. También deben definirse las características térmicas de los revestimientos, las dimensiones y localización del cerramiento. Es importante también que sean definidas todas las medidas activas de seguridad. Así mismo deberá indicarse la proximidad y la disponibilidad de medios del cuerpo de bomberos esperado. La temperatura ambiente antes del incendio se considera normalmente de 20°, pero puede ser modificada si los procesos de fabricación dan lugar a aumentos significados en algunas partes del recinto.

Para los límites del recinto, los tres parámetros que caracterizan sus propiedades térmicas son los siguientes:

- El calor específico c_p [J/kg·K]
- La densidad ρ [kg/m³]
- La conductividad térmica λ [W/m·K]

Estos parámetros permiten introducir la inercia térmica, presenta en los modelos simplificados bajo la forma del factor b definido como:

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p} \quad [\text{J/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{K}] \quad (\text{E3-1})$$



3.1.2 Carga de fuego

La carga de fuego de fuego se determina sumando el producto de la masa por el poder calorífico neto de todos elementos combustibles presentes en el edificio, según la ecuación (E3-2). Para la mayoría de los cálculos, se utiliza la densidad de carga de fuego, definida por la ecuación (E3-3). El RSIEI [5] da, en su Anexo1, unas tablas con las densidades de cargas de fuegos en naves industriales considerando su actividad.

$$Q_{tot,net} = \sum_i M_i \cdot H_{c,i} \cdot \Psi_i = \sum Q_{tot,net,i} \quad (E3-2)$$

$$q_{tot,net} = \frac{1}{A_{tot}} Q_{tot,net} \quad (E3-3)$$

Si el edificio presenta varios sectores de incendio, la densidad de carga de fuego total del edificio es dada por :

$$q_{tot,net} = \frac{\sum_i q_{cf,net,i} \cdot A_{cf,i}}{\sum_i A_{tot,i}} \quad (E3-4)$$

Donde:

- M_i es la masa de combustible i [kg]
- $H_{c,i}$ es el potencial calorífico neto del producto i [kJ/kg]
- Ψ_i es el coeficiente opcional que caracteriza las cargas protegidas
- A_{tot} es la superficie del suelo del sector de incendio
- A_{cf} es la superficie ocupada por la carga de fuego

Se consideran como protegidas las cargas de fuego en contenedores que presenten una cierta resistencia al fuego.

Es de primera importancia verificar si la carga de fuego dada por un objeto es efectiva o neta. Estos dos datos son ligados por la ecuación (E3-5). El factor m es un factor adimensional entre 0 y 1 que representa la eficacia de la combustión. Por los materiales usuales, se considera $m = 0,8$. La densidad de carga efectiva se puede ponderar con diferentes coeficientes para obtener la densidad de carga de fuego de diseño, que tiene en cuenta la influencia del tamaño del recinto, del tipo de edificio y de las diferentes medidas de protección activa. La densidad de carga de fuego de cálculo, definida por la ecuación



(E3-6) es la que se debe utilizar con las herramientas del concepto de modelos de incendios reales para calcular la curva de generación de calor.

$$q_{tot,eff} = m \cdot q_{tot,net} \quad (E3-5)$$

$$q_{tot,d} = m \cdot d_{q1} \cdot d_{q2} \cdot d_n \cdot q_{tot,net} \quad (E3-6)$$

Donde:

- d_{q1} es un coeficiente que tiene en cuenta el riesgo de ignición debido al tamaño del sector. (referirse tabla (3-1))
- d_{q2} es un coeficiente que tiene en cuenta el riesgo de ignición debido a la actividad. (referirse tabla (3-1))
- d_n es el producto de diferentes factores d_i que tienen en cuenta las diferentes medidas activas de lucha contra incendio. (referirse tabla (3-2))

Coeficientes δ_{q1} , δ_{q2}

Superficie de suelo del sector A_f [m ²]	Riesgo de inicio del incendio δ_{q1}	Riesgo de inicio del incendio δ_{q2}	Ejemplos de tipos de actividad
25	1,10	0,78	galería de arte, museo, piscina
250	1,50	1,00	oficina, residencia, hotel, industria papelera
2 500	1,90	1,22	fábrica de maquinaria y de motores
5 000	2,00	1,44	laboratorio químico, taller de pintura
10 000	2,13	1,66	fábrica de fuegos artificiales o de pinturas

Figura 3-1 : Coeficientes d_{q1} y d_{q2}

Coeficientes δ_{ni}

δ_{ni} Función de las medidas activas de lucha contra incendios											
Extinción automática				Detección automática			Extinción manual				
Sistema automático de extinción por agua	Fuentes independientes de suministro de agua			Detección y alarma automática		Transmisión automática de la alarma a los bomberos	Equipos propios de bomberos	Bomberos ajenos	Vías seguras de acceso	Equipo de lucha contra incendios	Sistema de control de humos
	0	1	2	de calor	de humo						
	δ_{n1}	δ_{n2}		δ_{n3}	δ_{n4}						
0,61	1,0	0,87	0,7	0,87 ó 0,73		0,87	0,61 ó 0,78		0,9 ó 1 ó 1,5	1,0 ó 1,5	1,0 ó 1,5

Figura 3-2 : Coeficientes d_{ni}

Estas dos tablas son extractas de la normativa UNE-UN-1991 [6] Anexo E.



Otro dato importante es la superficie máxima de fuego, es decir la superficie de la zona en cual se puede encontrar material combustible.

3.1.3 Características de los ocupantes

Para estudiar los problemas de evacuación es muy importante conocer también las características de los ocupantes del edificio. En este estudio, el edificio considerado es bastante pequeño, unos 150 m², sólo tiene una puerta principal, y será ocupado por pocas personas. Además, la organización de la evacuación no forma parte de los objetivos de este proyecto. El método completo para el estudio de la evacuación es presentado en el proyecto “Guía de Diseño para la Seguridad ante Incendio en Edificios Industriales”, ref [1], en su parte 2.

3.1.4 Selección de escenarios de incendio de cálculo

El objetivo final de toda esta recogida de informaciones es la determinación de unos escenarios de incendios reales que sean posibles y críticos. Cada uno de los escenarios representara un conjunto de eventos describiendo todo el desarrollo del fuego, de su inicio hasta que se apague.

Un punto muy importante en la selección de escenarios es la identificación de las localizaciones críticas de incendio. La combustión de la misma carga de fuego puede tener circunstancias muy diferentes según que el incendio sea localizado en el centro del recinto, contra una pared o en una esquina.

Los diferentes escenarios pueden también ser influenciados por el uso o no de las salidas de emergencia. Si el incendio ocurre mientras que el edificio esta vacío, puede ser que no se utilizan estas puertas y que el fuego sea privado de estas fuentes de aire. En recintos pequeños este parámetro puede influir mucho sobre la aparición del flash over.

3.2 Fuego de cálculo

Para acabar de definir el escenario, hace faltar dimensionar el fuego de calculo, es decir determinar la velocidad de generación de calor en fonación del tiempo así que otros parámetros importante como la evolución de la superficie de fuego o del ratio de pirolisis.



3.2.1 Método “Natural Fire Safety Concept”

Este método fue desarrollada en el proyecto de investigación “Competitive Steel Structures through Natural Fire Safety Concept” (NFSC1, 1999 & Schleich, 2001). Uno de los objetivos principales de este proyecto fue de determinar de manera científica y razonable la forma de la curva de liberación de calor. Los resultados son accesible tras proyectos de valorización como el “Concepto de Seguridad frente a Incendio Real” [2] que consiste en un resumen y una traducción al castellano de este proyecto europeo. También se encuentra una presentación de los resultados en el Anexo E del Eurocódigo 1 UNE-EN1991-1-2, 2004 [6].

Para la fase de ignición, el NFSC propone un tratamiento probabilístico del problema. El objetivo es de calcular la probabilidad de aparición utilizando coeficientes determinados a partir de estudios estadísticos. En este estudio, consideramos que la ignición ya tuvo lugar y no vamos a desarrollar esta parte. Para más información, referirse al proyecto, “Concepto de Seguridad frente a Incendio Real” [2], capítulo 5.

La generación de calor esta descrita por varios parámetros definidos como sigue:

La carga de fuego se define como en el párrafo 3.1.2, ecuación (E3-6) para tener en cuenta la influencia del recinto, de la actividad y de las medidas activas de seguridad.

La fase de crecimiento de la generación de calor se define como:

$$RHR(t) = 10^6 \left(\frac{t}{t_a} \right)^2 \quad (E3-7)$$

Donde

- RHR(t) es la generación de calor durante la fase de crecimiento [W]
- t es el tiempo (s)
- t_a es la constante de tiempo

Esta forma de curva de crecimiento es utilizada en muchos modelos. En esta modelización se considera que el fuego libera un flujo de calor constante y que la superficie de fuego crece radialmente desde el punto de ignición a velocidad constante. La constante de tiempo es el tiempo necesario para que la liberación de calor alcance 1 MW.

El calor máximo liberado por unidad de superficie, $RHR_{f,eff}$, es la cantidad máxima de calor liberada por el fuego por cada unidad de superficie, considerando que la combustión no sea limitada por el oxígeno. Esta cantidad tiene en cuenta el fenómeno de combustión incompleta y se considera constante durante todo el incendio.



La superficie máxima de fuego A_{cf} es la superficie efectiva del suelo que lleva combustible.

La fase constante del fuego empieza cuando el fuego alcanza esta superficie máxima. Durante esta fase $RHR(t)$ se calcula según la ecuación(E3-8).

$$RHR(t) = A_{cf} RHR_{f,eff} \quad (E3-8)$$

Esta fase constante puede ser limitada por:

- Las características de material combustible, el incendio esta controlado por combustible. La velocidad máxima de generación de calor esta dada por el valor en condiciones de combustión libre.
- El suministro de oxígeno limitado por la ventilación, el incendio esta controlado por ventilación. En este caso, $RHR_{f,eff}$ se puede evaluar con la formula siguiente:

$$RHR_{f,eff} = 1,4 \cdot 10^6 A_w \sqrt{H_w} \quad (E3-9)$$

Siendo:

- A_w el área de las aperturas [m^2]
- H_w la altura media de la aperturas verticales [m]

La fase de decrecimiento empieza cuando 70% de la carga total de fuego se ha quemado, ecuación (E3-10). Se supone que presenta un comportamiento lineal del $RHR(t)$. El tiempo de apagamiento espontáneo del incendio se determina con la ecuación (E3-11).

$$\int RHR(t) = 0,7 \cdot q_{tot,d} A_{cf} \quad (E3-10)$$

$$\int_0^{t_{fi,end}} RHR(t) dt = A_f q_{tot} \quad (E3-11)$$

Así se obtiene la curva de generación de calor enseñada en la figura (5-3)



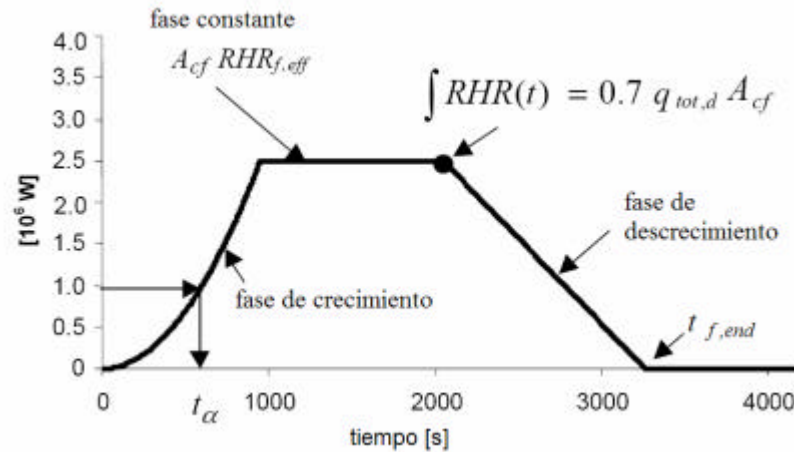


Figura 5-3: Curva de generación de calor obtenida con el NFSC

La curva de la superficie de fuego $A(t)$ tiene la misma forma, dado que se supone una liberación de calor constante por unidad de superficie $RHR_{f,eff}$.

La velocidad de pirolisis se puede deducir con la fórmula siguiente:

$$\dot{m}(t) = \frac{RHR(t)}{mH_{c,net}} \quad (E3-11)$$

Esto es la curva de fuego obtenida dadas las características de la carga de fuego, sin considerar la eventualidad del flash-over. A la hora de aplicarla a la simulación de un escenario dado, hay que comprobar si ocurre este fenómeno, lo que modificaría la curva de generación de calor.

3.2.2 Criterios para la modelización, una o dos zonas?

A parte de los fuegos estacionarios, es decir los que llegan directamente a la fase de liberación constante de calor, que afectan para ejemplo los vertidos de productos químicos muy inflamables, la mayoría de los fuegos reales presenta una fase de crecimiento progresiva. Como se ha visto en el capítulo 2.2.1, durante esta fase, el recinto puede dividirse en dos zonas. Una zona de gases calientes arriba y una zona fría clara de gases de combustión abajo.

Los parámetros del incendio son los siguientes:

- La temperatura de la zona superior T_u
- La altura de la interfase entre las zonas Z_s
- La área del fuego A_f



El combustible se define con:

- Su temperatura de ignición T_{ign}
- La superficie que ocupa la carga de fuego A_{cf}
- La altura de los elementos combustibles h_{cf}

La temperatura de aparición del flash over T_{fl}

Dados estos parámetros, se definen cuatro criterios para determinar si la modelización con dos zonas sigue valuable o si hay que pasar a un modelo con una sola zona. Este puede dar lugar a la modificación de la curva de RHR(t).

Criterio 1, C1: $T_u > T_{fl}$

La temperatura de la zona caliente supera la temperatura de flash over. Los otros elementos combustibles presentes en el recinto son encendidos por el calor radiado.

Criterio 2, C2: $Z_s < h_{cf}$ y $T_u > T_{ign}$

La altura del combustible supera la altura de la interfase, es decir que algunos elementos combustibles se encuentran en la capa caliente. Si la temperatura de esta zona es más elevada que la temperatura de ignición del combustible, esto conduce a la propagación del incendio a todo el recinto.

Criterio 3, C3: $Z_s < a1 \cdot h_{tot}$

La zona caliente ha crecido mucho, por tanto la interfase es muy baja y la zona fría muy pequeña. Esto no es representativo de un modelo por dos zonas, solo consideramos una zona caliente.

Criterio 4, C4: $A_f > a2 \cdot A_{tot}$

El área de fuego ocupa una grande parte de la superficie, así que el fuego no puede considerarse como localizado.

Para los parámetros T_{fl} , T_{ign} , $a1$ y $a2$ se pueden encontrar varios valores en la literatura. La tabla (5-4) da los valores encontrados en dos documentos de referencia en la redacción del presente proyecto. Ref [2] y [4]



Criterio	parametro	Fuente	
		JF Cadornin [4]	Valorización NFSC [2]
C1	T_{fl}	500°C	500°C
C2	T_{ign}	300°C	300°C
C3	a_1	0.2	0.1
C4	a_2	0.25	0.5

Figura 3-4: Valores posibles de los parámetros T_{fl} , T_{ign} , a_1 y a_2

La figura (3-5) presenta un resumen grafico de los cuatros criterios.

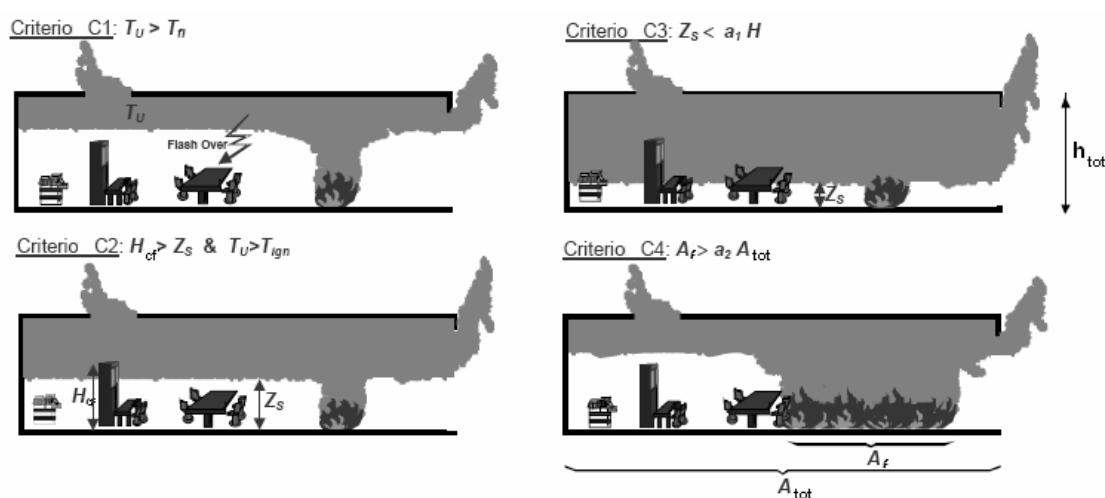


Figura 3-5: representación grafica de los criterios C1 a C4

Los criterios C1 y C2 dan lugar al flash over. Cuando ocurre este fenómeno, la velocidad de liberación de calor alcanza directamente su valor máximo. Hay que modificar la curva como lo enseña la figura (3-6). Es importante notar que la superficie bajo curva sigue la misma, solo cambian la forma de la fase de crecimiento y el punto de inicio de la fase de decaimiento.



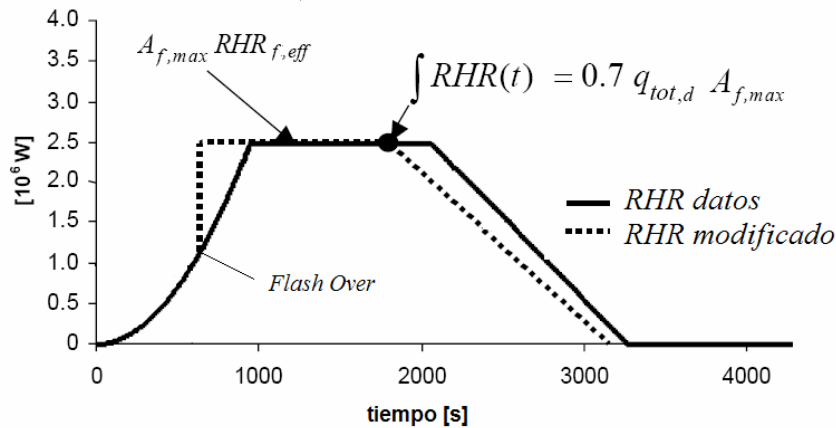


Figura 3-6: Curva de liberación de calor modificada por el flash over

3.2.3 Clasificación de los escenarios

En su tesis, JF Cadorin (ref [4]) establece que durante una simulación existen 8 tipos de escenarios posibles, según que se encuentran unos o varios de los criterios previamente definidos. Cinco de ellos pueden ocurrir si la carga de fuego esta localizada, y tres si esta repartida.

Carga localizada:

- Escenario 1:** No se encuentra ninguno de los criterios, el fuego queda localizado.
- Escenario 2:** Se encuentra C1 o C2, el flash-over ocurre y todo el combustible se incendie, dando lugar a una modificación de la curva de generación de calor. C3 no se encuentra, el modelo sigue de dos zonas.
- Escenario 3:** Se encuentra C1 o C2, el flash-over ocurre y todo el combustible se incendie, dando lugar a una modificación de la curva de generación de calor. C3 se encuentra, el modelo pasa de dos a una sola zona
- Escenario 4:** C3 se encuentra primero. El modelo pasa de dos a una sola zona. Después, ni C1 ni C2 se encuentran, la curva de generación de calor no tiene que ser modificada.
- Escenario 5** C3 se encuentra primero. El modelo pasa de dos a una sola zona. Después, o C1 o C2 se encuentra, la curva de generación de calor tiene que ser modificada.



Carga repartida:

Escenario 6: Se encuentra C1 o C2, el flash-over ocurre y todo el combustible se incendie de repente, dando lugar a una modificación de la curva de generación de calor. El salto de una a dos zonas se hace de manera instantánea.

Escenario 7: C3 o C4 se encuentra primero, el modelo pasa de directamente de dos a una zona. Ni C1 ni C2 se encuentran, la curva de generación de calor no tiene que ser modificada.

Escenario 8: C3 o C4 se encuentra primero, el modelo pasa de directamente de dos a una zona. O C1 o C2 se encuentra, la curva de generación de calor tiene que ser modificada.

El criterio C4 permite definir el límite entre una carga localizada y una carga repartida, por eso no puede ocurrir en caso de una carga localizada. Por las mismas razones, en caso de una carga repartida, C4 ocurre sin duda y el modelo tiene que pasar de dos a una zona.

Con todos estos elementos, definiciones, método de determinación de curva de liberación de calor, criterios de desarrollo de escenario, es posible definir con precisión escenarios de incendios reales. El capítulo siguiente consiste en una presentación de los principales herramientas de cálculo a la disposición de la ingeniería del fuego para determinar las temperaturas alcanzadas en un recinto durante un incendio real.



4 Principales herramientas para el análisis de incendios reales

Al momento de proceder al análisis de un incendio real que se desarrolla según un escenario predeterminado, hay que elegir el herramienta, o conjunto de herramientas el más adaptado al caso considerado. Cada herramienta se caracteriza por

- Su naturaleza – es decir si es un modelo analítico o numérico
- Su nivel de complejidad – se considera el numero de parámetros tenidos en cuenta, la forma de los resultados obtenidos, el tiempo de calculo para los modelos numéricos
- Su campo de utilización – seguramente la más importante de las características, considerando que fuera de este campo los resultados obtenidos no se pueden considerar como representativos de la realidad.

4.1 Modelos analíticos

Existen modelos analíticos para calcular varias características de un fuego o de un incendio. Este proyecto se limita a los que permiten obtener una representación de la temperatura dentro del recinto en función del tiempo. Los modelos analíticos permiten un análisis sencillo y rápido de un incendio.

4.1.1 Curvas de fuegos nominales

Históricamente, las curvas de fuegos nominales fueron desarrolladas para tener una referencia única y normalizada en los ensayos experimentales. Pero cuando se trata de dar una representación realista del desarrollo de un fuego real, estas curvas proveen un resultado muy pobre. De hecho están completamente independiente de les características del recinto y del fuego. Por su simplicidad esta herramienta es muy lejos del concepto de incendio real y no tiene en cuenta cualquier tipo de escenario. Su amplia utilización en los proyectos de construcción es mucho mas debida a un criterio histórico que a de eficacia.

Las curvas de fuegos nominales las más utilizadas son las curvas ISO dadas por las ecuaciones siguientes:



ISO Standard: $T = 20 + \log(8t + 1)$ (E4-1)

ISO Hidrocarburos: $T = 20 + 1080 (1 - 0,325 \cdot e^{(-0,167 \cdot t)} - 0,675 \cdot e^{(-2,5 \cdot t)})$ (E4-2)

Referirse a la figura (4-1) para su representación grafica.

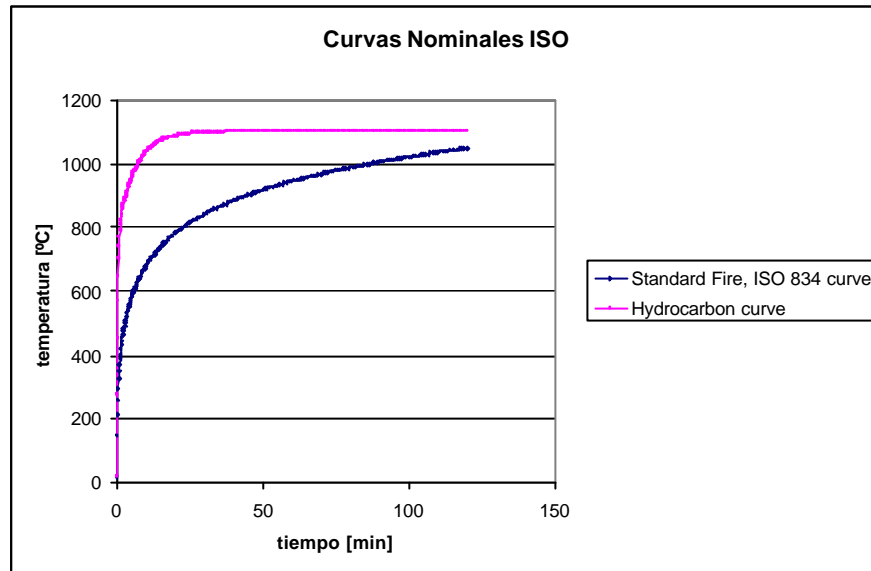


Figura 4-1: Curvas de fuegos nominales ISO

La curva ISO para hidrocarburos se utiliza cuando se supone que el combustible es un líquido, como para ejemplo en el caso de un vertido de producto químico muy inflamable. Comparativamente a la curva de fuego estándar tiene una velocidad de crecimiento mas elevada y llega a una temperatura asintótica de 1100°C. El único resultado es una temperatura única para todo el edificio, lo que corresponde a un fuego generalizado, modelo de una zona. Otra limitación importante es que no comportan ninguna fase de enfriamiento. En término de resistencia al fuego solo se pide una exposición de la estructura a la temperatura dada por la curva ISO durante una cierta duración.

4.1.2 Curvas paramétricas tiempo-temperatura

Las curvas paramétricas son un método simple para determinar la evolución de la temperatura dentro de un edificio durante un incendio, llevando en cuenta los fenómenos físicos de mayor importancia. Este tipo de modelo, como las curvas nominales, se dedica a describir los fuegos totalmente desarrollados o con carga de fuego repartida porque el único resultado es la evolución de la temperatura, que se considera homogénea en todo el recinto. Sin embargo dan una mejor representación de la realidad que las curvas



nominales, mientras que siguen modelos simples, basados en algunas expresiones analíticas, sin necesidad de herramientas informáticas avanzadas para su aplicación.

En la mayoría de los modelos encontrados en la literatura, los parámetros tomados en cuenta son:

- La geometría del compartimiento
- La carga de fuego
- Las aperturas verticales (ventanas y puertas)
- Las propiedades térmicas de los límites del compartimiento

El modelo retenido en el presente proyecto es el que se presenta, con carácter informativo, en el anexo A del Eurocódigo 1-1-2 [6]. Solamente es válido para una superficie del sector de incendio inferior a 500m^2 , sin oberturas en la cubierta y con una altura máxima de 4m. La carga de fuego se especifica sin ninguna condición sobre la combustión, hay que utilizar la densidad de carga de fuego de diseño, tal como definida en el 3.1.2

En su fase de calentamiento, la curva de temperatura en función del tiempo esta dada por:

$$\Theta_g = 20 + 1325 \left(1 - 0,324e^{-0,2t^*} - 0,204e^{-1,7t^*} - 0,472e^{-19t^*} \right) \quad (\text{P.1})$$

Donde:

- Θ_g la temperatura de los gases en el sector de incendio $[\text{°C}]$
- $t^* = t \cdot \Gamma$ el tiempo parametrico $[\text{h}]$ (P.2a)

con:

- t el tiempo $[\text{h}]$
- $G = \frac{[O/b]^2}{[0,04/1160]^2}$ $[-]$
- $b = \sqrt{(r \cdot c \cdot I)}$ la inercia térmica
en los límites siguientes: $100 \leq b \leq 2200$ $[\text{J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}]$
- r la densidad de los límites $[\text{kg/m}^3]$
- c el calor específico de los límites $[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$
- I la conductividad térmica de los límites $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$

nota : para calcular b , los valores de c , r y I pueden tomarse a temperatura ambiente.



$$- O = \frac{A_w \sqrt{h_w}}{A_{lim}} \quad \text{el factor de aberturas} \quad (P.2)$$

en los límites siguientes : $0,02 \leq O \leq 0,2$ $[m^{1/2}]$

- A_w la superficie total de la aperturas verticales $[m^2]$
- H_w la media ponderada de altura de las oberturas verticales $[m]$
- A_{lim} la superficie total de los limites $[m^2]$

La temperatura máxima T_{max} se obtiene para $t^* = t_{max}^*$

$$t_{max}^* = t_{max} \cdot \Gamma \quad [h] \quad (P.3)$$

Con: $t_{max} = \max. [(0,2 \cdot 10^3 \cdot q_{tot,d} / O), t_{lim}]$ $[h] \quad (P.4)$

Donde:

- $Q_{tot,d}$ es la carga de fuego de diseño, relativa a A_{tot}

$$q_{tot,d} = \frac{q_{f,d} \cdot A_{cf}}{A_{tot}} \quad [MJ/m^2]$$

- $q_{f,d}$ la carga de fuego de diseño relativa a la superficie de fuego $[MJ/m^2]$
- $t_{lim} = 25$ minutos para un fuego de desarrollo lento
 $= 20$ minutos para un fuego de desarrollo medio
 $= 15$ minutos para un fuego de desarrollo rápido

Nota : cuando $t_{max} = t_{lim}$, el fuego esta controlado por el combustible.

Cuando $t_{maz} = t_{lim}$, la variable t^* de la ecuación (P.1) se sustituye por:

$$t^* = t \cdot \Gamma_{lim} \quad (P.2b)$$

Con:

$$- \Gamma_{lim} = \frac{[O_{lim} / b]^2}{[0,04 / 1160]^2} \quad (P.5)$$

$$- O_{lim} = 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot q_{tot,d} / t_{lim} \quad (P.6)$$

Si ($O > 0,04$ y $q_{tot,d} < 75$ y $b < 1160$) , Γ_{lim} en la ecuación (P.5) tiene que ser multiplicado por k

$$k = 1 + \left(\frac{O - 0,04}{0,04} \right) \cdot \left(\frac{q_{tot,d} - 75}{75} \right) \cdot \left(\frac{1160 - b}{1160} \right) \quad (P.7)$$



Las curvas de fuegos parametrizados no presentan la fase constante, una vez alcanzada la temperatura máxima empieza la fase de enfriamiento dada por:

$$\Theta_g = \Theta_{\max} - 625(t^* - t_{\max}^* \cdot x) \quad \text{para} \quad t_{\max}^* \leq 0,5 \quad (\text{P.8a})$$

$$\Theta_g = \Theta_{\max} - 250(3 - t_{\max}^*)(t^* - t_{\max}^* \cdot x) \quad \text{para} \quad 0,5 \leq t_{\max}^* \leq 2 \quad (\text{P.8b})$$

$$\Theta_g = \Theta_{\max} - 250(t^* - t_{\max}^* \cdot x) \quad \text{para} \quad 2 \leq t_{\max}^* \quad (\text{P.8c})$$

Donde:

- t^* viene dado por la ecuación (P.2a)
- $x = 1$ si $t_{\max} > t_{\lim}$
- $x = \frac{t_{\lim} \cdot \Gamma}{t_{\max}^*}$ si $t_{\max} = t_{\lim}$

En el Anexo A de este proyecto se enseñan dos casos tratados como ejemplos por P. Vila Real en su libro "Incendio em Estruturas Metálicas" [7].

4.2 Modelos numéricos

Hoy en día existe una grande variedad de modelos numéricos desarrollados por y para la ingeniería del fuego. Es bastante difícil clasificar y compararlos porque pueden tener características y objetivos muy variados. Un recién examen publicado por Olenick y Carpenter en 2003, clasifica unos 170 modelos con campos de aplicaciones diferentes: modelos por zonas, mecánica computacional de fluidos, resistencia de estructuras, simulación de evacuación, etc... Los resultados de este examen son disponible en la pagina web <http://www.firemodelsurvey.com/> [7].

El objetivo principal de este proyecto siendo la determinación del campo de temperaturas dentro de un edificio industrial tras de varios escenarios de incendios reales, los modelos los más adaptados son los modelos por zonas y los modelos de mecánica computacional de fluidos – o modelos de campo-. Dentro de los 54 modelos por zonas y 20 modelos de campo se ha decidido trabajar con uno de cada categoría: Ozone como modelo por zonas y FDS (Fluid Dynamic Simulator) como modelo de campo.

Este capítulo presenta los programas utilizados y sus principales hipótesis y métodos de calculo.



4.2.1 Modelos por zonas

Los modelos por zonas son, hoy en día, una herramienta muy utilizada a la hora de evaluar la evolución de las temperaturas en un edificio en caso de incendio. Son basados en un número limitado de hipótesis, son bastante sencillos de usar y dan buenos resultados desde que son en su campo de aplicaciones.

La hipótesis principal es que el recinto está dividido en dos zonas separadas por una interfase horizontal, y que la temperatura es homogénea en cada zona. En modelos de una zona, la temperatura se considera como homogénea en todo el compartimiento. La figura (4-2) enseña esta repartición según el modelo elegido. En los modelos de dos zonas, la zona superior, cerca del techo, es caliente, y la zona inferior es fría. Los modelos de dos zonas se utilizan por los fuegos localizados o en fase de pre-flash over, y los modelos de una zona para los fuegos generalizados o completamente desarrollados. Ozone, recomendado por la Guía de Diseño [1], incluye estos dos tipos de modelos y además permite pasar de uno al otro durante la misma simulación.

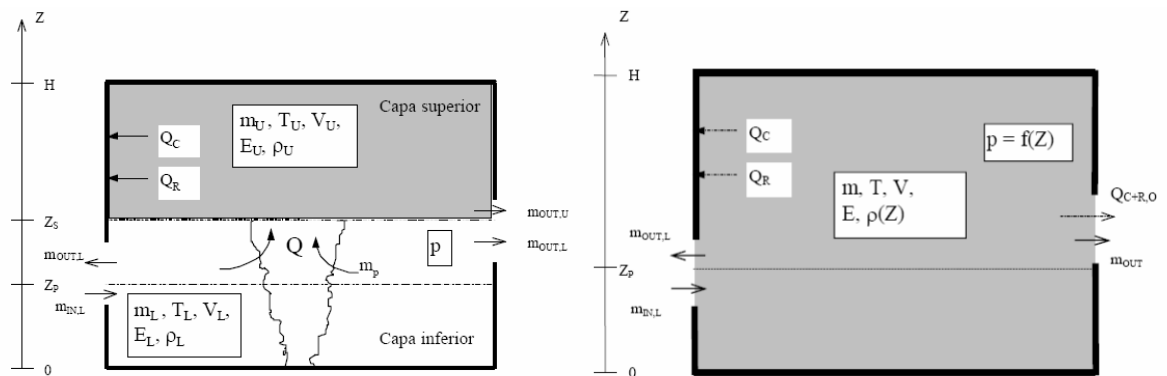


Figura 4-2: Representación gráfica de la modelización por zonas

Los modelos por zona requieren datos más detallados que los métodos analíticos:

- Las dimensiones del compartimiento y de cada apertura en lugar de un único factor de aperturas.
- Las propiedades térmicas de cada pared tienen que ser descritas, con posibilidad de materiales o espesores diferentes en lugar de una única inercia térmica.
- Se precisa no solamente la carga de fuego, pero también la curva de liberación de calor, la velocidad de pirolisis, el calor de combustión del material combustible, etc...



Estos modelos resuelven las ecuaciones diferenciales que indican la conservación de la masa y de la energía para cada una de las zonas, considerando los intercambios entre las capas. Al nivel de resultados, no solo proporcionan la evolución de las temperaturas en las zonas, sino también información adicional como las pérdidas de calor a través de las paredes o aberturas, o las velocidades de los gases atravesar las aberturas. La altura de la interfase entre las capas es otro resultado muy importante de los modelos de dos zonas. El espesor de la capa inferior, que queda a una temperatura reducida y bastante limpia de productos de combustión, es importante a la hora de estudiar las condiciones de habitabilidad del recinto para los ocupantes.

Los cuatro criterios definidos en el párrafo 3.2.2 de este documento definen el límite de utilización de los modelos de dos zonas. Si se encuentra uno de estos criterios, hay que pasar a un modelo de una sola zona. El programa Ozone integra estos criterios y pasa automáticamente de un modelo al otro, modificando la curva de liberación de calor cuando es necesario.

4.2.2 Ozone

En este proyecto se ha elegido Ozone como programa de modelo de zonas. Este programa es recomendado por la guía de diseño [1], muchas pruebas con simulaciones reales de incendios han enseñado que sus resultados son representativos de la realidad. Este capítulo viene como introducción al programa. El manual [9] y la tesis de JF Cadourin [4] proveen una información muy completa sobre este modelo. El Ozone se puede descargar en <http://www.ulg.ac.be/matstruc/Download.html> [10] con toda la información técnica necesaria.

Como modelo de dos o una zona, Ozone sigue las grandes hipótesis de esta familia de modelos (división del recinto en una o dos zonas de temperatura homogénea). En este capítulo se presentan los principios fundamentales del modelo numérico, tanto de una como de dos zonas, y también se presenta el interfaz usuario del programa.

4.2.2.1 Fundamentales del modelo numerico:

El modelo de dos zonas es basado en 11 variables físicas. Estas variables son ligadas por 7 condiciones y cuatro ecuaciones diferenciales que describen los balances de masa y energía en las dos zonas.

Las 11 variables son las siguientes:

- M_U y M_L La masa de gas, respectivamente en la capa superior (*Upper*) y en la capa inferior (*Lower*)
- T_U y T_L Las temperaturas de los gases en cada zona



- V_U y V_L Los volúmenes de las capas
- E_U y E_L las energías internas
- ρ_U y ρ_L La densidad de los gases en cada zona
- p La presión absoluta en el recinto

Los 7 constreñimientos son:

- $\rho_i = \frac{M_i}{V_i}$
- $E_i = c_v(T)M_iT_i$
- $p = \rho_iRT_i$
- $V = V_U + V_L$

Con :

- $i = U; L$ según la zona considerada (*Upper o Lower*)
- $c_v(T)$ el calor específico del gas en el recinto
- R el constante universal de los gases

Básicamente, las ecuaciones de conservación de masa y de energía en cada zona pueden expresarse como:

“ En cada momento, la variación de masa del gas en una zona es igual a la masa de gases de combustión creados por el fuego, más la masa de los gases que entran a través de la aperturas (horizontales, verticales y forzadas), menos la masa de los gases que salen por las aperturas. “

“ En cada momento, existe un balance entre la energía liberada en el compartimiento por la combustión, la energía utilizada para calentar los gases en el recinto y los límites del recinto, y la energía perdida por el flujo de gases a través de las apertura y por radiación “

Este conjunto de ecuaciones y condiciones da lugar a un sistema de 4 ecuaciones diferenciales, presentadas en la pagina 8 del manual del Ozone [9].

En el modelo de una zona, solo hay 6 variables y 4 constreñimientos, dado que solo hay una zona con propiedades consideradas homogéneas. Los balances de masa y energía se solo se hacen para una zona. En este caso, el sistema de ecuaciones diferenciales se reduce a 2 ecuaciones.



4.2.2.2 Presentación de la interfase usuario

Uno de los objetivos del equipo creador del Ozone era de conseguir una cierta sencillez en la utilización del programa. La interfase se presenta como una sucesión de tablas en cuales los parámetros pueden ser o predefinidos o determinados por el usuario. La figura (4-3) enseña la tabla inicial:

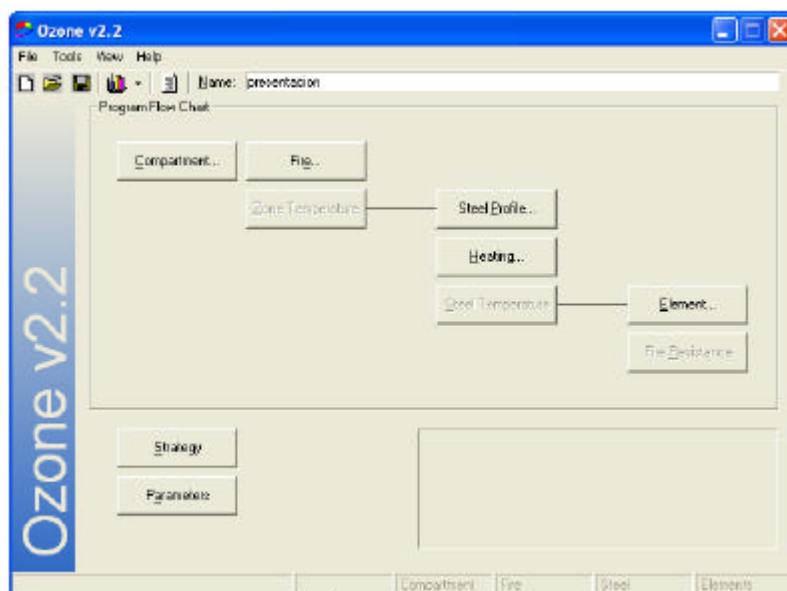


Figura 4-3: pantalla inicial del Ozone

La primera etapa consiste en la definición del recinto, en un clic en “compartment” llegamos a esta tabla:

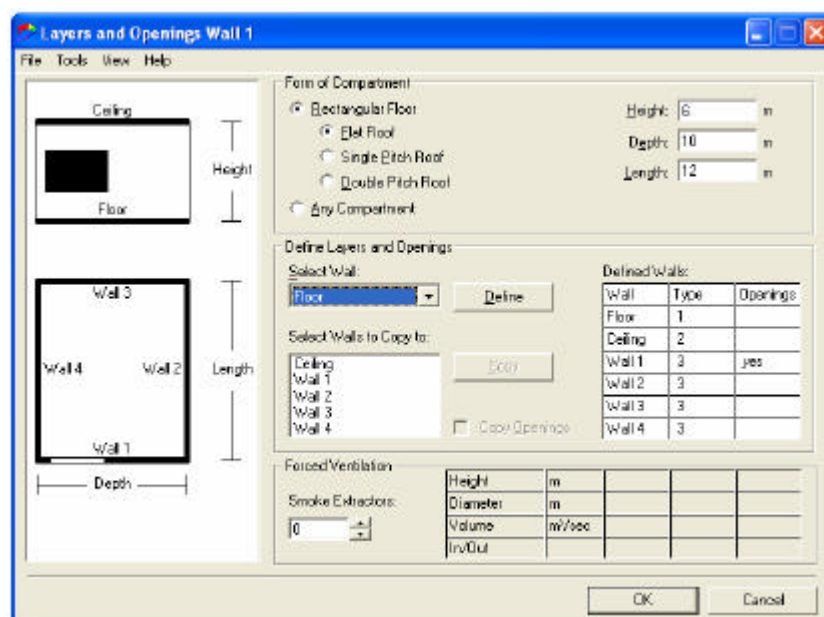


Figura 4-4: definición del recinto



En primer lugar se definen las dimensiones exteriores del recinto, supuesto rectangular. También se puede precisar el tipo de techo, si es plano, con uno o con dos inclinaciones. Los elementos de ventilación forzada, “smoke extractors” se definen para todo el compartimiento, sin dato de posición preciso.

Las cuatros paredes, el techo, y el suelo se pueden definir de manera independiente. La figura (4-5) enseña como se definen las capas de las paredes y las aberturas. El modelo Ozone lleva algunos materiales predefinidos, pero siempre existe la posibilidad de crear cualquier material específico entrando sus propiedades térmicas

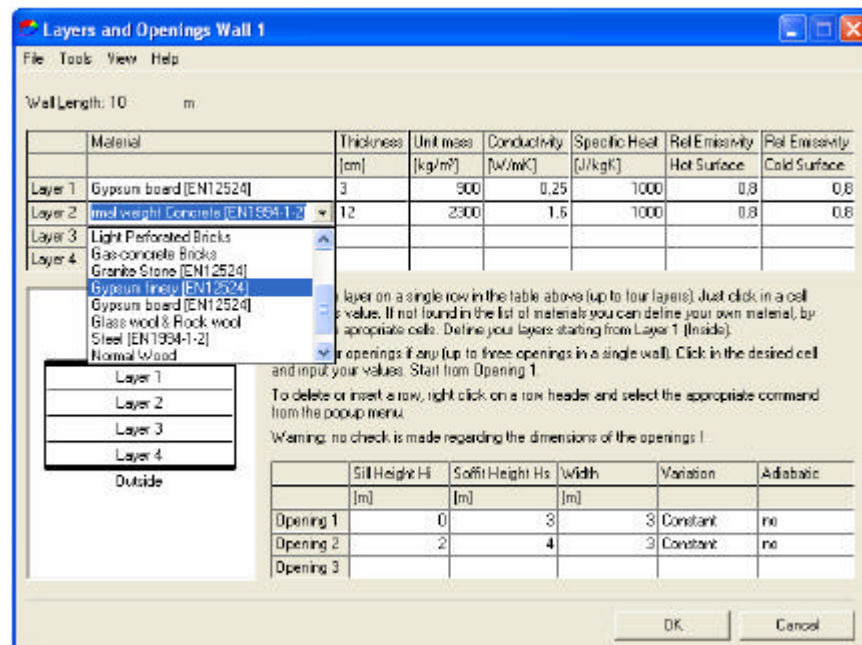


Figura 4-5: definición de las paredes y aberturas

Las aberturas definidas en esta pantalla no son forzadas. Se puede definir el tamaño y la posición vertical, el modo de control de la apertura (pendiente del tiempo, de la temperatura, inmediato o siguiendo una curva progresiva...) y el comportamiento térmico (si es adiabático o no). Evidentemente no se pueden definir aperturas en el suelo, y las aperturas del techo son consideradas como verticales.

Después de definir el compartimiento, se debe definir el fuego. Un clic en “fire” en la pantalla principal permite acceder a esta pantalla de definición del fuego, figura (4-6): La primera alternativa propuesta es una determinación basada en el NFSC design fire: El Ozone lleva unos valores predeterminados de velocidad de crecimiento, velocidad de generación de calor, carga de fuego y riesgo de ignición para algunas actividades. La



carga de fuego de cálculo se determina como explicado en el capítulo 3.1.2. Se piden también para completar esta definición unos parámetros muy influyentes en la aparición del flash-over como la área máxima de fuego, la altura del fuego y la altura del combustible.

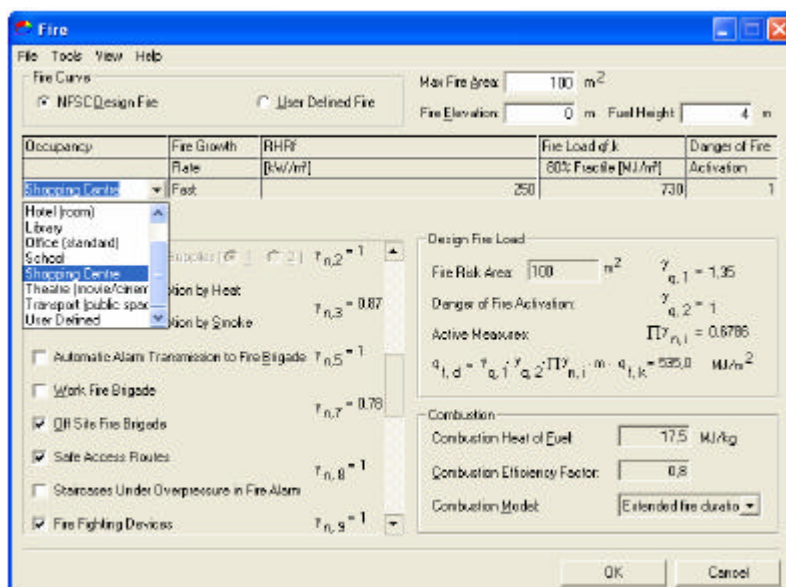


Figura 3-6: definición del fuego de cálculo con el método NFSC

A caso de una actividad demasiado alejada de las propuestas o bien definida para calcular la carga de fuego de cálculo de manera más precisa, existe la opción del fuego totalmente definido por el usuario (fig 3-7):

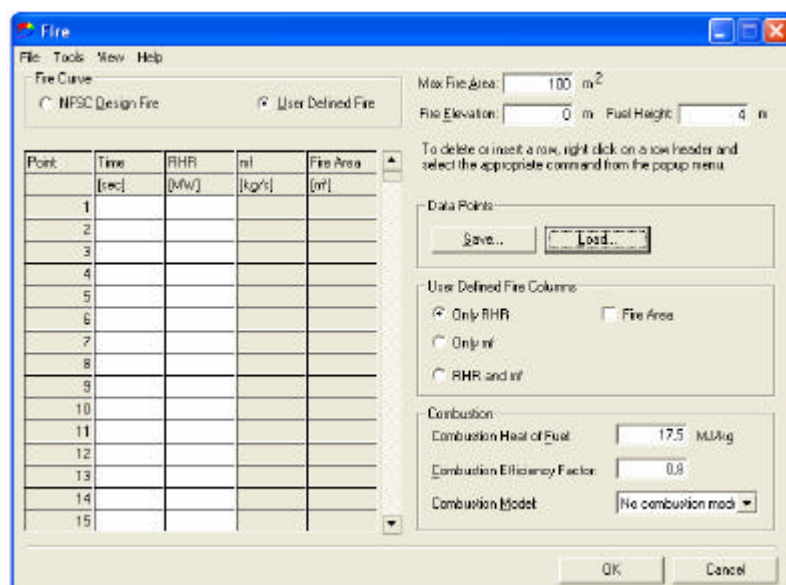


Figura 3-7: definición del fuego de cálculo por el usuario



Esta opción permite entrar directamente los parámetros del fuego en función del tiempo.

Un parámetro muy importante, a la hora de definir el fuego, es el modelo de combustión. Este parámetro define la manera de utilizar el modelo numérico y puede dar lugar a modificaciones de la curva de liberación de calor. Tres modelos son disponibles:

“No combustión model” - En este caso, la presencia o no de oxígeno dentro del edificio no se lleva en cuenta. Los balances de masa y de energía se hacen considerando el RHR y la velocidad de pirolisis de los datos. Este modelo sirve para modelizar ensayos donde se han medido el RHR y la velocidad de pirolisis, o casos de fuegos controlados por combustible.

“External flaming combustión model” - En este caso, se considera la posibilidad de llamas externas al recinto. Toda la carga de fuego esta transformada en el recinto, pero con cese del calor al medio exterior. El RHR es limitado por el oxígeno, pero la velocidad de pirolisis queda igual. Cuando todo el oxígeno se ha consumido, la combustión esta incompleta.

“Extended fire duration model” - Este modelo supuesta que la velocidad de pirolisis, o de perdida de masa, esta proporcional a la cantidad de oxígeno que entra en el recinto en caso de fuego controlado por ventilación. No se considera ninguna combustión externa y toda la energía esta liberada dentro del recinto. La duración del fuego se alarga hasta que todo el combustible sea quemado. Este modelo fue desarrollado para aplicaciones de diseño y es lo que se utilizara preferiblemente en este proyecto.

Para más información sobre estos modelos, es preferible referirse a la pagina 23 del manual de Ozone [9].

Antes de pasar al cálculo, falta definir los parámetros y la estrategia. La estrategia permite elegir entre un modelo de una o dos zonas, o la combinación automática de los dos. En este caso hay que definir los parámetros de la transición. La pantalla de parámetros permite definir el comportamiento de las aberturas, las condiciones iniciales, los intercambios de calor a través de las paredes, la duración de la simulación, etc...

Una vez definidos el recinto, el fuego de cálculo y la estrategia, el cálculo puede empezar con un clic en “Zone Temperature” en la pantalla de inicio. El cálculo da lugar a un informe donde figuran todos los parámetros, la estrategia de estudio y los principales resultados: temperatura de la zona alta, posición de la interfase entre zonas y curva de RHR. Otros resultados, como la curva de velocidad de pirolisis o de masa de oxígeno en el recinto, pueden ser obtenidos a parte.



Otro grupo de funciones del Ozone permite calcular en campo de temperatura en un elemento de la estructura. Dados que esto queda fuera de los objetivos de este proyecto, no se presentan las funciones de esta parte.

4.2.3 Modelos de mecánica de fluidos computacional

Los modelos de mecánica de fluidos computacional son los modelos los más avanzados. En comparación con los modelos descritos previamente, estos modelos hacen muy pocas simplificaciones a priori respecto a los procesos de transferencia de masa y de calor. La mayoría de estos modelos son basados en soluciones, en tres dimensiones y dependiente del tiempo, de las leyes fundamentales de conservación. Las ecuaciones de Navier-Stokes son resueltas, sin simplificación, y en muchos puntos del espacio, mediante métodos de elementos finitos. Estos códigos necesitan intervalos de tiempo muy pequeños y una rejilla muy fina, lo que implica un tiempo de cálculo muy largo.

En la mayoría de los casos, el modelo de cálculo termodinámico y aerodinámico se dobla de un modelo especial para tratar el problema de las turbulencias, como el modelo k-ε o el “Large Eddy Simulation”.

Los resultados, del hecho de la división del espacio en muchos elementos (fig. 3-8), son dados con mucho más detalles que en los modelos de zonas. Las variables como la temperatura, las concentraciones de especies químicas o la velocidad del flujo de aire, son dadas en todos los nodos de la rejilla. Por eso, los post-procesadores, que permiten la visualización de los resultados, son muy importantes para los modelos de MFC. Las figuras (3-8), (3-9) y (3-10) son obtenidas con el programa SmokeView, post-procesador del Fire Dynamics Simulator (FDS).

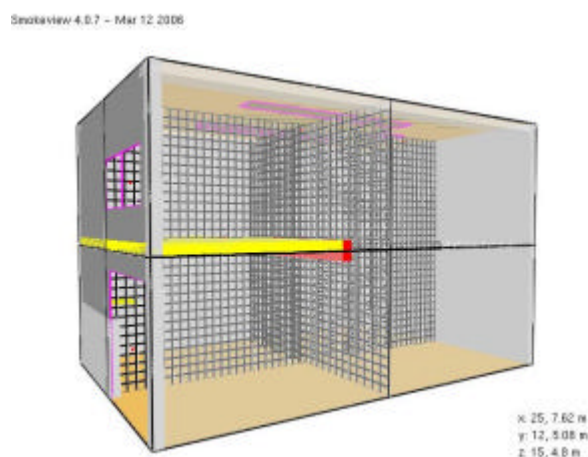


Figura 6-8: división del compartimiento en elementos finitos



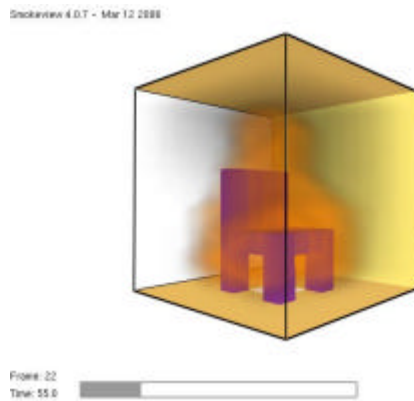


Figura 6-9: Visualización realista del incendio con llamas y humos

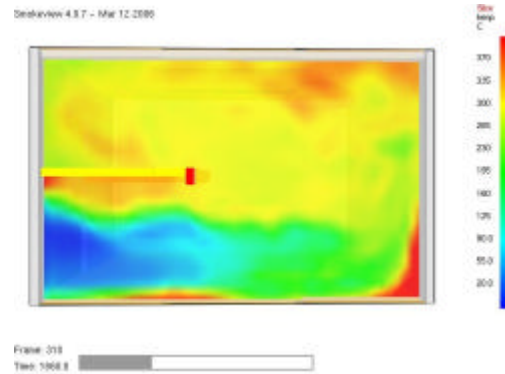


Figura 6-10: Visualización del campo de temperatura en un plano determinado

4.2.4 FDS, “Fire Dynamics Simulator”

Para hacer este proyecto se ha elegido utilizar el programa “Fire Dynamics Simulator”, acompañado de su post-procesador SmokeView.

La última version de FDS, FDS.4 (julio 2004), y SmokeView se pueden descargar con toda su documentación técnica en la página web: <http://www.fire.nist.gov/fds/> [11]

4.2.4.1 Presentación general

El FDS es un modelo de Mecánica de Fluidos Computacional (MFC) especializado para el estudio de flujos generados por fuego. Se apoya en la resolución de una forma de las ecuaciones de Navier-Stokes dichas de “*low Mach number*” apropiada para velocidades bajas. La velocidad de los gases en un incendio son del orden de unos 10-20m/s, lo que es muy lejos de la velocidad del sonido en el aire. Esta formulación es adaptada a los flujos creados por efectos térmicos y movimientos de humos. De hecho se eliminan directamente los efectos de compresión de los gases que crean fenómenos como ondas acústicas u ondas de choque.

Otra parte muy importante es el modelo utilizado para tratar las turbulencias que se encuentran en la zona de pirolisis al límite entre la llama y el aire. En el FDS, las turbulencias son tratadas por el modelo de Large Eddy Simulación (LES).

La eficacia del FDS es, por parte, debida a la elección de una geometría muy sencilla de los elementos. Cada plano del espacio (XY, XZ y YZ) tiene que ser dividido en una rejilla,



produciendo una red de elementos paralelepípedos. Esto permite utilizar métodos simplificados y directos para la resolución del campo de presión. Puede ser una limitación para tratar geometrías complejas, pero con rejillas suficientemente finas se puede aproximar cualquier geometría.

El tamaño de la rejilla es un punto fundamental para la precisión de los resultados. Para preguntas de homogeneidad, está mejor tener elementos de geometría cercana a un cubo, con sus tres dimensiones más o menos iguales. En general, más fina es la rejilla, mejor es la resolución numérica de las ecuaciones. FDS resuelve ecuaciones del segundo orden en tiempo y espacio. Dividiendo el tamaño de cada celda por dos, el error de discretización se divide por cuatro mientras que el tiempo de cálculo es multiplicado por $2^4 = 16$ (un factor 2 por cada dimensión más uno para el tiempo). Algunos estudios sobre la influencia del tamaño de rejilla han sido realizados. Los resultados enseñan que la precisión del análisis es función del ratio del diámetro característico del fuego D^* dividido por el tamaño de una celda. En estos estudios, la mejor precisión no siempre está obtenida con la rejilla la más pequeña. Desgraciadamente, los resultados de estos estudios son poco aplicables a otros escenarios y la mejor manera de encontrar el tamaño óptimo de rejilla es de hacer una serie de test propia al caso estudiado.

Las celdas así definidas permiten caracterizar toda la geometría del problema. De hecho, el usuario tiene la posibilidad de definir obstrucciones – es decir objetos – cuya geometría es obligatoriamente forzada de coincidir con las celdas de la rejilla. En cada elemento finito las propiedades son consideradas homogéneas.

Para elementos “vacíos”, es decir que no forman parte de un objeto, por lo tanto son llenos de gas, el programa calcula para cada intervalo de tiempo los parámetros siguientes:

- Temperatura del gas
- Velocidad del gas
- Concentración de la especies químicas
- Concentración de humos y factor de visibilidad
- Presión
- RHR por volumen unitario (si el volumen contiene combustible)
- Densidad del gas



Para los elementos llenos de material sólido, cuyas propiedades han sido descritas por el usuario, el programa calcula las cantidades siguientes:

- Temperatura de los límites y en el interior
- Flujo de calor, convectivo y radiativo
- Velocidad de combustión

Y finalmente, para todo el sistema, el programa devuelve:

- El RHR total
- Los tiempos de activación de los detectores de calor y humos
- Los flujos de masa y energía a través de las aberturas y límites

Estos resultados pueden ser registrados y salen en forma de planos coloreados y con animación, vectores o archivos delimitados por coma. El tamaño de los archivos de resultados puede alcanzar unos GB porque cada información está guardada en cada intervalo del tiempo de integración. Al principio de la simulación, el usuario tiene que posicionar sus detectores en el modelo y precisar para cada uno las cantidades deseadas. Hay que hacerlo con cuidado porque es imposible recuperar otros datos una vez la simulación hecha.

Según sus creadores, el campo de utilización de este programa sigue siendo los estudios de diseño con fuego predeterminado, es decir con $RHR_{total}(t)$ conocido. Aún que el FDS permite la definición de muchas características térmicas o químicas de los materiales, sigue muy difícil desarrollar un escenario de fuego realista incluyendo la ignición de un objeto por el otro. Faltan muchos datos y la modelización de la propagación del fuego sigue siendo un problema mal resuelto. Implica un gran número de fenómenos complejos como desplazamientos de flujos multi-fase, mezclas turbulentas, aerodinámica de baja velocidad, transferencias de calor,...etc....Además, la caracterización de los flujos de calor dentro de los materiales está bastante bien dominada, pero los datos sobre la combustión y la pirolisis de los materiales todavía no son disponibles. Este campo de la ingeniería del fuego está todavía en su inicio. Esto parece bien normal, dado que los objetos que forman el combustible en un incendio no son considerados como tal en su utilización normal.

El guía de referencia técnica de FDS [12] provee una información muy completa sobre la teoría de base y las hipótesis del modelo.

4.2.4.2 ¿Como utilizar FDS?

FDS es un programa de Fortran 90 y su desarrollo empezó hace 25 años para llegar a una primera versión pública en 2000.



Para utilizar este programa, hay que redactar un archivo de datos en un editor de texto. Este archivo debe proveer todos los parametros a tener en cuenta para desarrollar el escenario. También se precisan en el archivo de datos todo lo que concierna los puntos de medidas. Estos parametros se organizan en grupos, cada grupo teniendo sus parametros propios. Existen al total 24 grupos para describir familias de parámetros o datos. Por ejemplo, el grupo OBST permite crear obstrucciones, el grupo VENT permite definir las aberturas, el grupo THCP los puntos de medida,..etc.. todos los grupos existentes y sus posibles parámetros son listados en el appendix B del guia de utilización de FDS [13]. Cada linea del archivo de data contiene datos que pertenecen al mismo grupo. La figura (4-11) da una idea general de cómo se presenta un archivo de datos.



```

calibr4 - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
&HEAD CHID='calibr4',TITLE='calibración fds' / All output files will have names beginn
&GRID IBAR=20,JBAR=20,KBAR=15
&POIM XBAR=4,YBAR=4,ZBAR=3 /
&MISC REACTION='PROPANE' /
&TIME TWFN=1000.0 / time when finished (length of simulation)
&REAC ID='PROPANE'
FYI='PROPANE, C_3 H_8'
MW_FUEL=44
MU_O2=5.
MU_CO2=3.
MU_H2O=4.
SOOT_YIELD=0.01 /
&SURF ID = 'CONCRETE'
FYI = 'test param'
C_P = 1
DENSITY=1800.
KS = 1.15
DELTA = 0.1 /
&VENT XB= 0.2, 3.8, 0.2, 3.8, 0, 0, SURF_ID='BURNER',//
&SURF ID='BURNER', HRRPUA=100.0, TMFWAL=30.,RAMP_Q='BURN_UP',//
&RAMP ID='BURN_UP', T=0.0, F=0/
&RAMP ID='BURN_UP', T=10.0, F=0.04/
&RAMP ID='BURN_UP', T=20, F=0.18/
&RAMP ID='BURN_UP', T=33, F=0.49/
&RAMP ID='BURN_UP', T=45, F=0.83/
&RAMP ID='BURN_UP', T=50, F=1/
&RAMP ID='BURN_UP', T=300, F=1/
&RAMP ID='BURN_UP', T=600, F=0/
&OBST XB= 0, 0.2, 0, 4, 0, 3, RGB=0.7,0.7,0.7,SURF_ID='CONCRETE' / hormigon 1
&OBST XB= 3.8, 4, 0, 4, 0, 3, RGB=0.9,0.9,0.9,0.6, SURF_ID='CONCRETE' / hormigon 2
&OBST XB= 0.2, 3.8, 0, 0.2, 0, 3, RGB=0.9,0.9,0.9,0.7, SURF_ID='CONCRETE' / hormigon
&OBST XB= 0.2, 3.8, 3.8, 4, 0, 3, RGB=0.7,0.7,0.7, SURF_ID='CONCRETE' / hormigon 4
&OBST XB= 0.2, 3.8, 0.2, 3.8, 2.8, 3, RGB=0.9,0.9,0.9,0.7/ techo
&HOLE XB= 0.5, 3.5, 0, 0.1, 0.5, 1, /ventana1
&VENT XB= 0.5, 3.5, 0, 0, 0.5, 1, SURF_ID='OPEN' /vent ventana 1
&HOLE XB= 1.4, 2.6, 1.4, 2.6, 2.8, 3, /ventana2
&VENT XB= 1.4, 2.6, 1.4, 2.6, 3, 3, SURF_ID='OPEN' /vent ventana 2
&SLCF PBZ=1.5,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=2,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY=2,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /

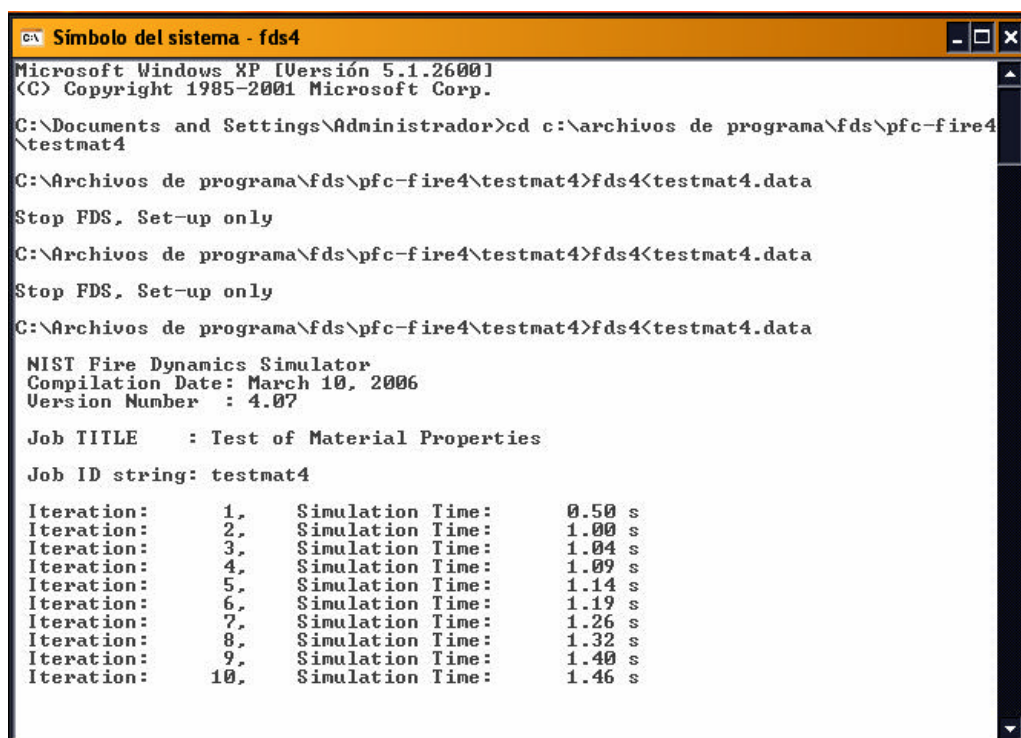
```

Figura 4-11: Vista general de la organización de un archivo de datos



Dado la complejidad de la redacción completa de unos de estos archivos de datos, se recomienda empezar modificando archivos de casos parecidos al caso estudiado. La definición de los puntos de medidas también requiere mucha atención: al final de la simulación sólo se pueden obtener las medidas de los puntos introducidos en el archivo de datos.

Después de la redacción bajo un editor de texto, hay que compilarlo y la simulación empieza. La ventana del Procesador de Comandos queda abierta y permite seguir la evolución del cálculo. Enseña el número de iteraciones y el tiempo de simulación correspondiente.



```

C:\ Símbolo del sistema - fds4
Microsoft Windows XP [Versión 5.1.2600]
(C) Copyright 1985-2001 Microsoft Corp.

C:\Documents and Settings\Administrador>cd c:\archivos de programa\fds\pfc-fire4\testmat4

C:\Archivos de programa\fds\pfc-fire4\testmat4>fds4<testmat4.data
Stop FDS, Set-up only

C:\Archivos de programa\fds\pfc-fire4\testmat4>fds4<testmat4.data
Stop FDS, Set-up only

C:\Archivos de programa\fds\pfc-fire4\testmat4>fds4<testmat4.data

NIST Fire Dynamics Simulator
Compilation Date: March 10, 2006
Version Number : 4.07

Job TITLE : Test of Material Properties
Job ID string: testmat4

Iteration:      1,      Simulation Time:      0.50 s
Iteration:      2,      Simulation Time:      1.00 s
Iteration:      3,      Simulation Time:      1.04 s
Iteration:      4,      Simulation Time:      1.09 s
Iteration:      5,      Simulation Time:      1.14 s
Iteration:      6,      Simulation Time:      1.19 s
Iteration:      7,      Simulation Time:      1.26 s
Iteration:      8,      Simulation Time:      1.32 s
Iteration:      9,      Simulation Time:      1.40 s
Iteration:     10,      Simulation Time:      1.46 s
  
```

Figura 4-12: evolución de la simulación

Desde el principio de la simulación, los resultados dados bajo la forma de planes animados o colorados, o de vectores, pueden consultarse en el SmokeView mientras que sigue procesando la simulación. Para los resultados dados en formato de archivos de datos separados por coma, hay que esperar hasta el final del cálculo. La fecha final de la simulación es dada por el comando TWFIN (Time When Finish) seguido de una duración en segundos. En la fase de definición de la geometría del caso estudiado, poner TWFIN=0.0 permite visualizar directamente la geometría en SmokeView sin calcular nada.



Desde que aparece el mensaje “STOP: FDS completed successfully “ se pueden consultar todos los resultados compilados.

Durante la simulación se escribe también un archivo de texto .OUT en el cual se registran todas las informaciones relativas a la simulación (lista de los datos, tiempo de computación, errores...)



5 Estudio de un caso concreto, la nave TIPO

5.1 Presentación del edificio

La nave TIPO es una nave pequeña, unos 155 m² de superficie al suelo con una sola planta, destinada a recibir una grande variedad de actividades.

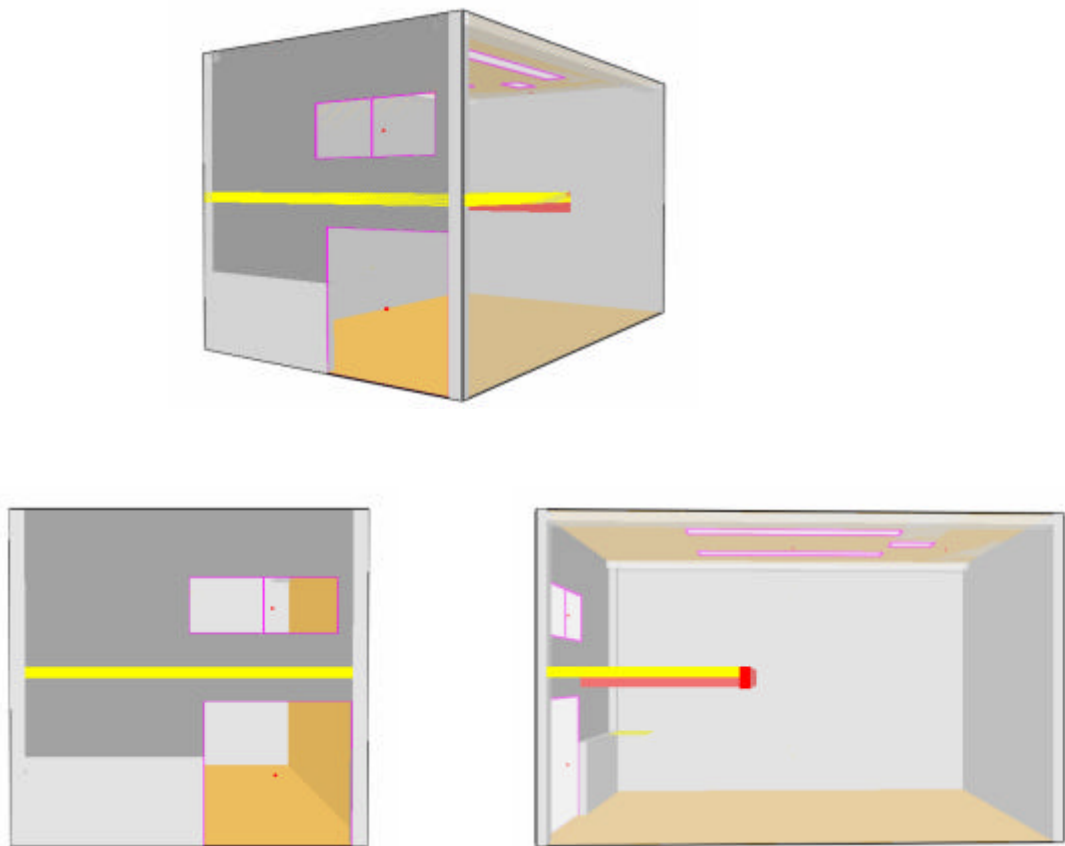


Figura 5-1: Vista generales de la nave TIPO, obtenidas con Smoke View.

Las naves TIPO son destinadas a montarse en conjuntos de 13 naves y la seguridad contra incendio es un tema muy importante: hay que asegurarse que un incendio en un compartimiento no se propagara a todos los otros.



5.1.1 Propiedades geométricas

Dimensiones exteriores:

- Longitud: 15.2m
- Anchura: 9.2m
- Altura: 9.5m

- Superficie : 155m²
- Volumen: 1473m³

Propiedades de los límites:

- Suelo: hormigón
- Techo: cobertura multi-capa con paneles de poliéster
- Paredes: paneles de hormigón
- Para-llamas PanelRoc

Aperturas:

En la fachada:

- Una puerta metálica 4x4 m²
 - Dos ventanas de cristal 1.9x2 m²
- Superficie total de las aperturas en la fachada: 22.46m²

En el techo:

- Un Colt 1380x600mm²
 - Dos paneles de poliéster 1000x6500mm²
- Superficie total de las aperturas en el techo: 13.9m²

5.1.2 Propiedades térmicas

La propiedades térmicas del edificio son resumidas en la tabla (5-2)

Las temperaturas indicadas para el cristal y el poliéster son las temperaturas de abertura de las aberturas constituidas por estos materiales.

	CP [kJ/kg]	KS [W/mK]	ρ [kg/m ³]	comentario
Hormigon	1	1,15	1800	Middle weight Concrete[EN12524]
Aluminio	0,94	200	2700	
PanelRoc	1	0,041	175	
Cristal				Ta = 300°C
Poliester				Ta = 150°C

Figura 5-2: propiedades termicas del recinto.



5.2 Propuestas de escenarios de incendio

La nave TIPO no se dedica a un tipo de actividad en particular. Al contrario, puede adaptarse muy bien a los requisitos de muchas utilizaciones. Una vez el edificio definido, la actividad tiene una importancia muy grande en la definición de los escenarios de incendio. De ella dependen muchos parámetros clave como la carga de fuego, su repartición, el riesgo de ignición, etc...

5.2.1 Propuestas de distribución en planta

La nave Tipo puede recibir una grande variedad de actividades diferentes, que van a dar lugar a cargas de fuego de niveles muy diferentes. Dado que en este proyecto se trata de simular incendios reales, este capítulo presenta unas propuestas de lay-out posibles para varias actividades en la nave nido. Estas propuestas constituyen unas evaluaciones de lo que puede ser la densidad de carga de fuego en la nave.

Se nota que, en la mayoría de los casos de las figuras (5-3) a (5-6), la densidad de carga total es más baja que el valor máximo que se puede encontrar en toda la planta. La densidad máxima de la carga de fuego se encuentra solamente en una parte de la zona de almacén o de la zona de producción, y el valor de la densidad total de carga de fuego tiene en cuenta la presencia de zonas de circulación o de menor densidad de carga (servicios, oficinas...).





Figura 5-3: Propuesta de lay-out para un taller de reparación de coches.



Figura 5-4: Propuesta de lay-out para un taller de pintura de coches

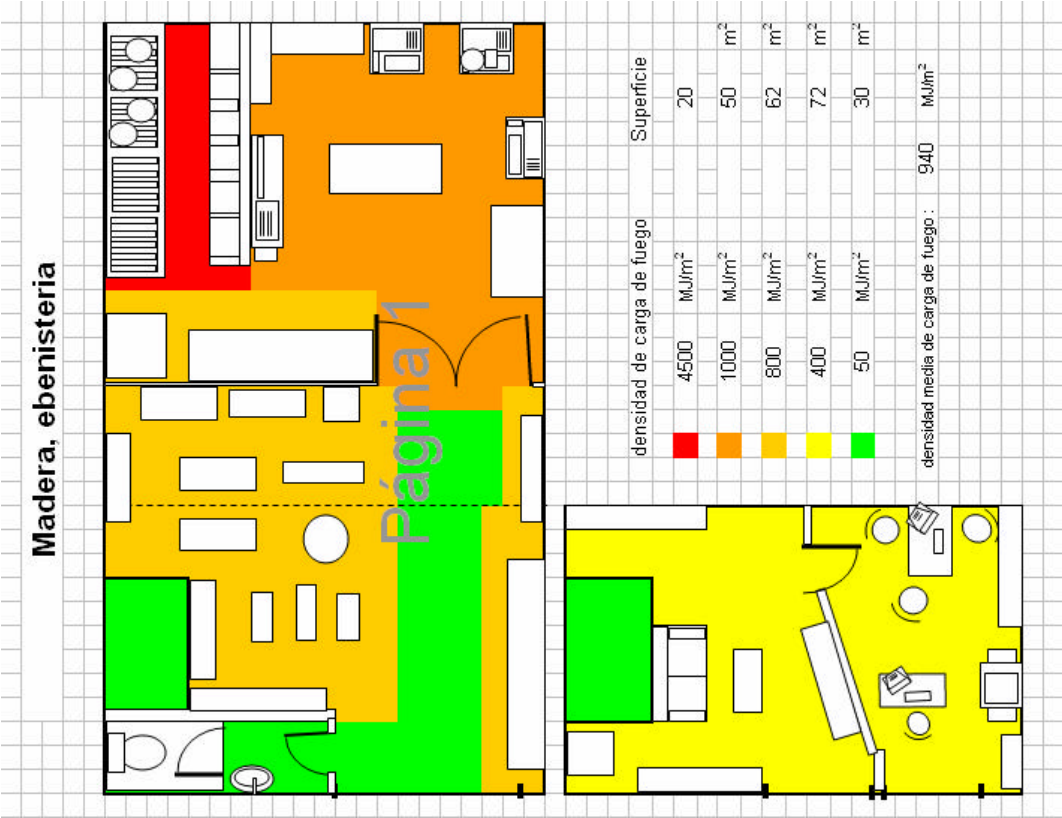


Figura 5-6: Propuesta de lay-out para un taller de ebanisteria

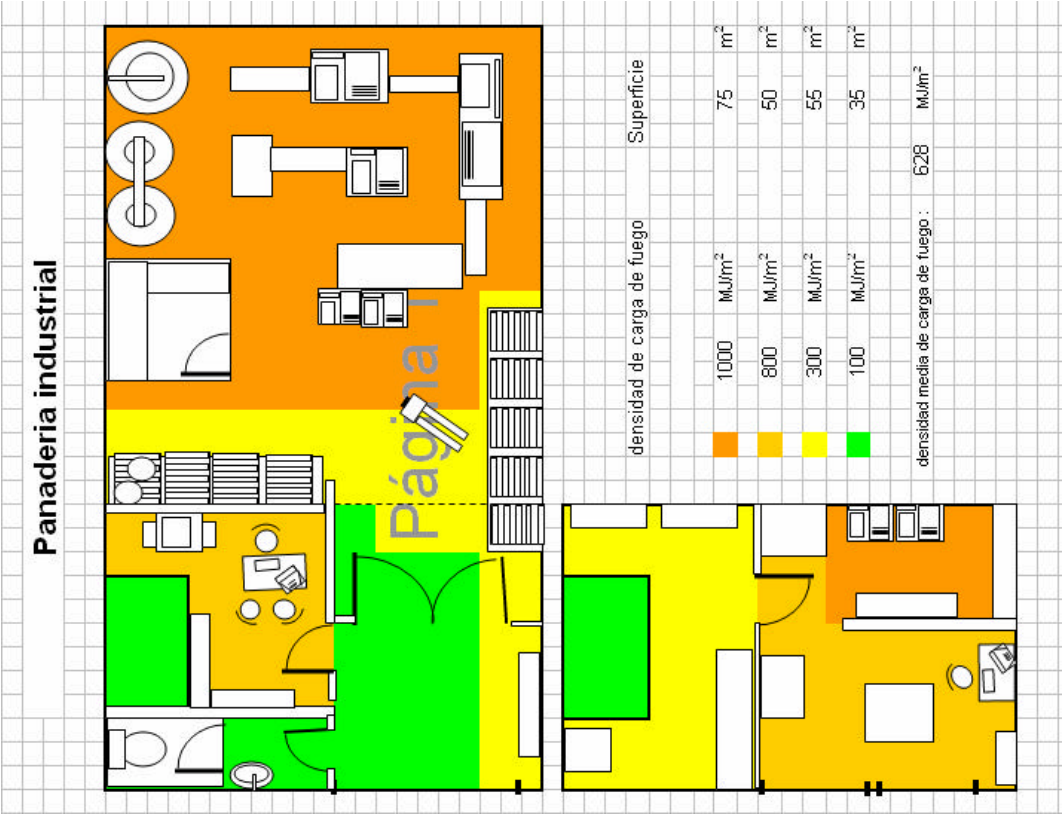


Figura 5-5: Propuesta de lay-out para una panaderia industrial



La densidad de carga de fuego esta determinada a partir de los valores dados en el Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales [5]. La carga de fuego de calculo, ponderada por los factores adecuados, se calcula como enseñado en el capitulo 3.1.2

En los cuatros casos presentados, las densidades de carga de fuego nunca dan lugar a un riesgo mayor que el nivel 4 dado por la tabla (5-7) extracta de [5]. Estos ejemplos son presentados a efectos informativos, y es cierto que en los escenarios de fuegos retenidos para el estudio de la nave se podrían encontrar unos con riesgo mayor. Considerando la presencia de zonas de circulación o de carga de fuego casi nula, se considera una superficie de fuego máxima de 120m^2 .

Nivel de riesgo intrínseco		Densidad de carga de fuego ponderada y corregida	
		Mcal/m ²	MJ/m ²
BAJO	1	$Q_g \leq 100$	$Q_g \leq 425$
	2	$100 < Q_g \leq 200$	$425 < Q_g \leq 850$
MEDIO	3	$200 < Q_g \leq 300$	$850 < Q_g \leq 1275$
	4	$300 < Q_g \leq 400$	$1275 < Q_g \leq 1700$
	5	$400 < Q_g \leq 800$	$1700 < Q_g \leq 3400$
ALTO	6	$8005 < Q_g \leq 1600$	$3400 < Q_g \leq 6800$
	7	$1600 < Q_g \leq 3200$	$6800 < Q_g \leq 13600$
	8	$3200 < Q_g$	$13600 < Q_g$

Figura 5-7: niveles de riesgo intraseco con respecto a la densidad de carga de fuego.

5.2.2 Escenarios de incendio

Un escenario de incendio real debe definir claramente el desarrollo del incendio de la fase de ignición hasta la finalización del fuego. En este proyecto, no se considera la fase de ignición, sino a través de un factor de ponderación de la carga de fuego de cálculo. La modelización empieza con una ignición de la carga de fuego a la fecha $t = 0$. Para el desarrollo del fuego, se siguen las hipótesis del NFSC, presentadas en el capitulo 3.2.1. El programa Ozone permite la obtención de la curva de liberación de calor de calculo, como visto en la figura (3-6), capitulo 3.2.2. Entonces, el modo operativo para cada simulación va a ser el siguiente:



- Elegir los parámetros del incendio
- Hacer una primera simulación con el Ozone
- Recuperar la curva de liberación de calor calculada por el Ozone y entrarla en el archivo.data del FDS.
- Comparar los resultados.

Para calcular un fuego con el método NFSC, Ozone pide los parámetros siguientes:

- Propiedades geométricas y térmicas del compartimiento, definidas en el capítulo 5.1
- La geometría y el modo de control de las aberturas
- La área máxima de fuego
- La altura del combustible
- La velocidad de crecimiento del fuego
- El RHR_{maxi}
- La densidad de carga de fuego
- Los factores d_{q1} , d_{q2} y d_{qn}

En esta lista, hay algunas valores que son fijos, otras que dependen del combustible y de su reparto y otros son función de varios parametros.

Este proyecto es más un proyecto de investigación que realmente de validación. En este sentido, la elección de los escenarios de estudio no solamente deben presentar los casos los mas desfavorables, pero también un abanico de los casos los mas probables. La tabla (5-8) propone una base para clasificar los escenarios posibles:

densidad de carga de fuego	Nave TIPO								
	Carga localizada				Carga repartida				
	15m²		35m²		70m²		110m²		
Nivel 1 de 0 a 425 MJ/m²	puerta		puerta		puerta		puerta		A
	ta=500sec	cerrada	ta=500sec	cerrada	ta=500sec	cerrada	ta=500sec	cerrada	
Nivel 2 de 425 a 850 MJ/m²	puerta		puerta		puerta		puerta		B
	ta=500sec	cerrada	ta=500sec	cerrada	ta=500sec	cerrada	ta=500sec	cerrada	
Nivel 3 de 850 a 1275 MJ/m²	puerta		puerta		puerta		puerta		C
	ta=500sec	cerrada	ta=500sec	cerrada	ta=500sec	cerrada	ta=500sec	cerrada	
Nivel 4 de 1275 a 1700 MJ/m²	puerta		puerta		puerta		puerta		D
	ta=500sec	cerrada	ta=500sec	cerrada	ta=500sec	cerrada	ta=500sec	cerrada	
Nivel 5 de 1700 a 3400 MJ/m²	puerta		puerta		puerta		puerta		E
	ta=500sec	cerrada	ta=500sec	cerrada	ta=500sec	cerrada	ta=500sec	cerrada	
	1	2	3	4	5	6	7	8	

Nomenclatura de los escenarios :

- La letra indica el nivel de densidad de carga de fuego
- El numero indica la configuración de la carga de fuego y el modo de abertura de la puerta

ejemplo : el escenario ESC C3 corresponde a una densidad de carga de nivel 3 debida a una carga localizada en una superficie de 35 m² y la puerta se abre despues de 500s de incendio.

 Escenarios utilizados en las pruebas

Figura 5-8: clasificación de los diferentes escenarios posibles



La tabla (5-8) debe utilizarse junta con la tabla (5-9) que da la densidad de carga de fuego necesaria en la área de fuego para tener un cierto nivel de riesgo intrínseco en el edificio considerando la ecuación (E5-1).

$$q_{tot,net} = \frac{q_{cf,net} \cdot A_{cf}}{A_{tot}} \quad (E5-1)$$

Donde:

- A_{cf} es la superficie ocupada por la carga de fuego
- A_{tot} es la superficie total de suelo del recinto

Superficie de la nave : 155 m²

densidad de carga de fuego total	Superficie del sector de fuego [m ²]			
	15	35	70	110
0 MJ/m ²	0	0	0	0
425 MJ/m ²	4392	1882	941	599
850 MJ/m ²	8783	3764	1882	1198
1275 MJ/m ²	13175	5646	2823	1797
1700 MJ/m ²	17567	7529	3764	2395
3400 MJ/m ²	35133	15057	7529	4791
Densidad de carga de fuego en el sector de incendio [MJ/m ²]				

Figura 5-9: Densidad de carga de fuego en el sector de incendio respecto al tamaño del sector y al nivel de riesgo intrínseco en el recinto

En esta clasificación (figura 5-8), se conservan para todos los casos los parámetros siguientes:

- Propiedades geométricas y térmicas del recinto
- Las temperaturas de activación de las aberturas controladas por temperatura
- La altura del combustible, 5m
- La velocidad de crecimiento del fuego, con un tiempo de 150s para llegar a un $RHR_{total}(t)$ de 1 MW (fast)

La organización de las pruebas y los resultados obtenidos basándose en estos escenarios son presentados en el capítulo 5.3



5.2.3 Calibración de los programas

Antes de poder comparar los resultados de los dos modelos numéricos en este estudio, hay que asegurarse del nivel de confianza que se puede acordar a cada uno. También, hay que verificar que los dos modelos representan la misma realidad y que los resultados a comparar son de la misma naturaleza.

Con el escenario ESC C3, se propone comparar los siguientes resultados:

- Temperatura de la zona caliente
- Masa de O₂ en el recinto
- La posición del interfase entre las capas fría y caliente

También vamos a comprobar la importancia de un parámetro clave en la utilización de FDS, el tamaño de rejilla.

5.2.3.1 Influencia del tamaño de la rejilla

El tamaño de rejilla es un parámetro muy importante que tiene influencia en la precisión de los resultados obtenidos por el FDS. Hay que elegir el mejor compromiso entre la precisión y el tiempo de cálculo.

La geometría de la nave TIPO es bastante sencilla dado que sólo se consideran los límites y el altillo. Desde que no se intenta representar geometrías muy complejas, la rejilla no tiene necesidad de ser muy fina. Se propone comparar tres rejillas diferentes con elementos cúbicos de 22, 30 y 40cm.

Esta prueba consiste en la comparación de los resultados obtenidos simulando un escenario correspondiente a un riesgo bajo. Los puntos de medida de temperatura son dos detectores puntuales situados en el medio de la nave, a 3 y 8m de altura. Los resultados son presentados en las figuras (5-10) y (5-11)



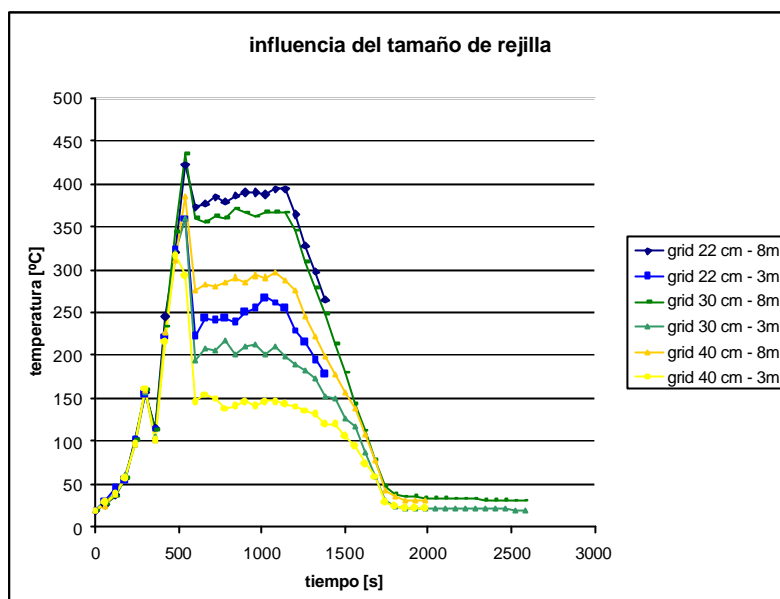


Figura 5-10: temperaturas medidas en función del tamaño de la rejilla

	rejilla	dx rejilla [cm]	CPU Time	
			para 1000s	para 1500s
X grid	40	38,0	58h	/
Y grid	25	40,8		
Z grid	24	39,6		
X grid	50	30,4	18h 25min	36h 50min
Y grid	36	28,3		
Z grid	32	29,7		
X grid	75	20,3	4h 20min	8h 45min
Y grid	45	22,7		
Z grid	40	23,8		

Figura 5-11: tiempo de cálculo respecto al tamaño de la rejilla

La prueba con la rejilla de 22cm fue parada antes de llegar al final porque era demasiado lenta. Los resultados obtenidos con la rejilla de 30cm son bastante cercanos de los de la rejilla de 22cm. Para el detector de temperatura mayor (Z=8m), la diferencia esta bajo de los 10%. La rejilla de 40cm, aun que permite obtener resultados en un tiempo bastante corto, da resultados demasiado alejados de la dos otras simulaciones para poder ser considerada como fiable.

Haciendo el compromiso entre tiempo de cálculo y la fiabilidad de los resultados, se elige trabajar con la rejilla de 30cm.



5.2.3.2 Comparación FDS / Ozone

Los dos programas elegidos para este estudio utilizan dos modelos numéricos diferentes pero ambos permiten evaluar los mismos parámetros del incendio. Dado que son programas reconocidos por su fiabilidad, que son recomendados en varios reglamentos y que ya fueron utilizados en varios estudios de referencia, verificar que dan resultados cercanos permite comprobar la cualidad de la modelización. Por ser de naturaleza diferente, los dos códigos tienen cada uno su campo de aplicación en este estudio. Hay que asegurarse que los resultados de cada uno de los programas pueden utilizarse para finalizar el estudio.

El Ozone, dado su rapidez, permite tratar un grande numero de casos y enseñar cuales son los casos atípicos o que merecen mas atención. El FDS, al contrario, no permite tratar muchos casos, pero da una información mucho mas detallada.

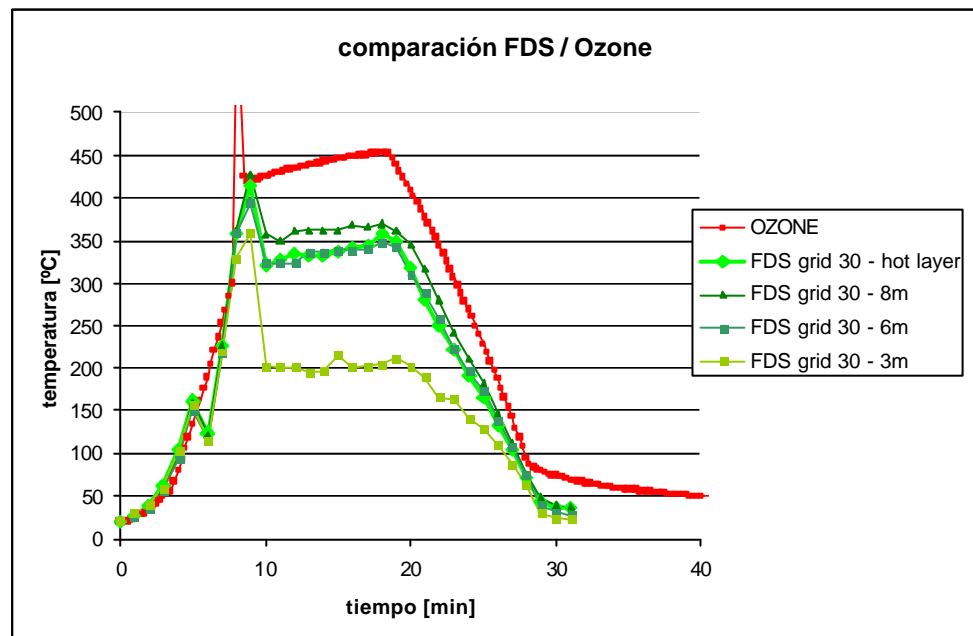


Figura 5-12: Comparación de las curvas de temperatura en la zona alta dadas por los dos programas

Comparando los resultados de temperatura de la zona alta obtenidos por los dos programas, se nota que el FDS da valores mas bajos que el Ozone. En la documentación técnica del programa FDS, sus conceptotes indican que los resultados son, en general, dados con un rango de error del orden del 5 a 20% respecto a las pruebas reales. El principal campo de aplicación de FDS es la determinación de los movimientos de humos y tiene una tendencia a minimizar el campo de temperaturas.



Las temperaturas dadas por el FDS son normalmente medidas con detectores puntuales, su localización influyen mucho el resultado. Para hacer una comparación con los resultados del Ozone, existe una opción que permite determinar una temperatura media de zona alta, son los puntos llamados “FDS – hot layer”. Los otros puntos de medida de esta comparación son situados en el medio del recinto a diferentes alturas.

Una posible fuente de diferencia entre los dos programas es el tratamiento de las oberturas: Ozone les trata de manera independiente, considerando una circulación del fluido hacia dentro y hacia fuera del edificio en cada abertura. Al contrario el FDS permite un tratamiento mal globalizado de las oberturas, lo que tiene mucha importancia cuando las oberturas son situadas a alturas diferentes.

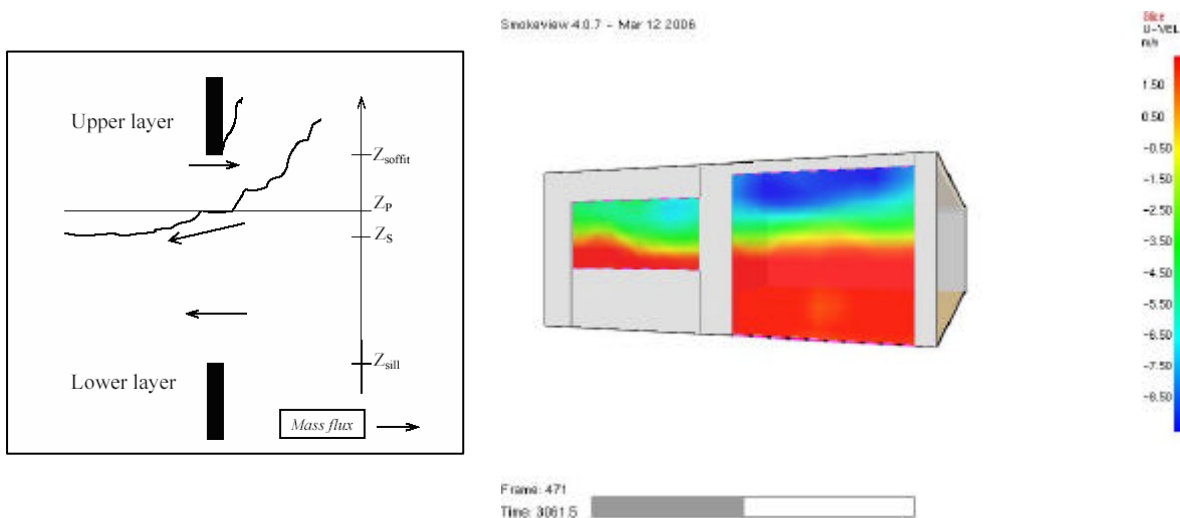


Figura 5-13: Modelización del flujo de aire en las oberturas con el modelo Ozone

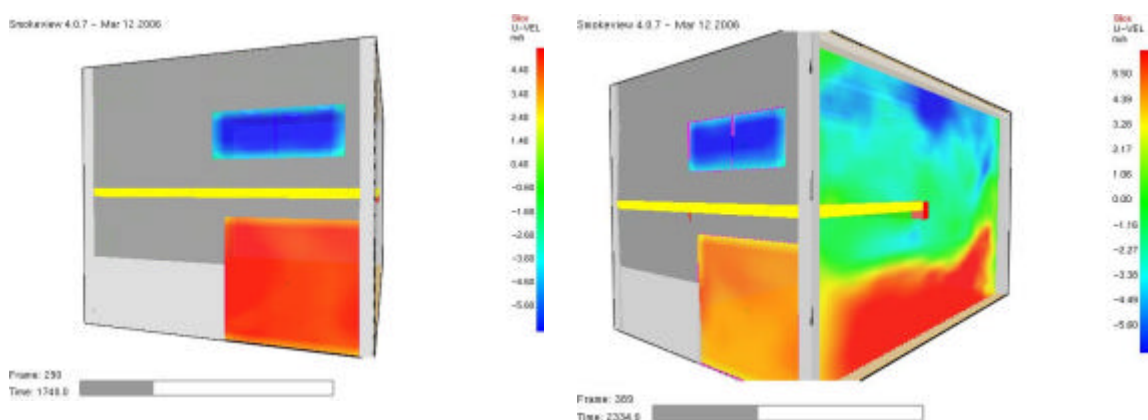


Figura 5-14: Modelización del flujo de aire en las oberturas con el modelo FDS



Las figuras 5-13 y 5-14 enseñan la diferencia de modelización de la circulación de aire en los dos programas (la escala de color da la velocidad horizontal –positiva o negativa- del flujo de aire según el eje perpendicular a las oberturas). En la figura 5-13, se nota que el modelo de doble sentido de circulación de aire utilizado en el Ozone es valuable si las oberturas son a la misma altura media. La figura 5-14 enseña que, en el caso de la nave TIPO, el programa FDS considera una circulación global del aire, lo que permite una mejor renovación del aire en el recinto. En este escenario, la combustión nunca es limitada por el oxígeno. La admisión de más aire fresco no contribuye a una mejor combustión pero hace bajar la temperatura en el recinto. La figura 5-15 enseña la masa total de O₂ en el recinto en función del tiempo. Al principio las curvas se siguen, pero cuando la puerta se abre, a $t = 500s$ (8min), la masa de O₂ está superior en el modelo FDS, debido a una mejor renovación del aire

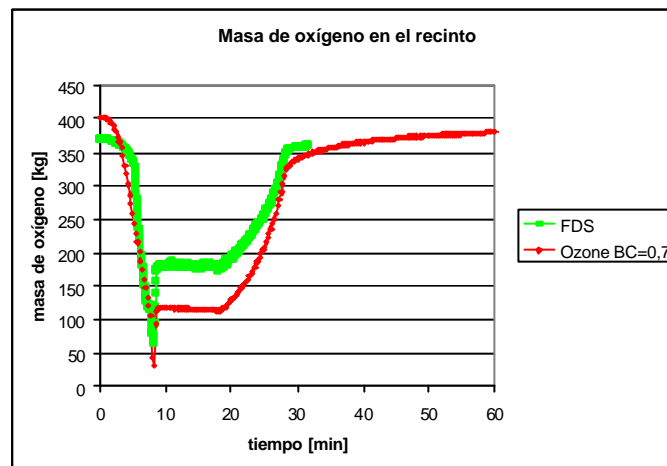


Figura 5-15: Masa de oxígeno en el recinto – puerta abierta despues de 500s

Para comprobar la validez de esta hipótesis se realiza una prueba con la puerta cerrada.

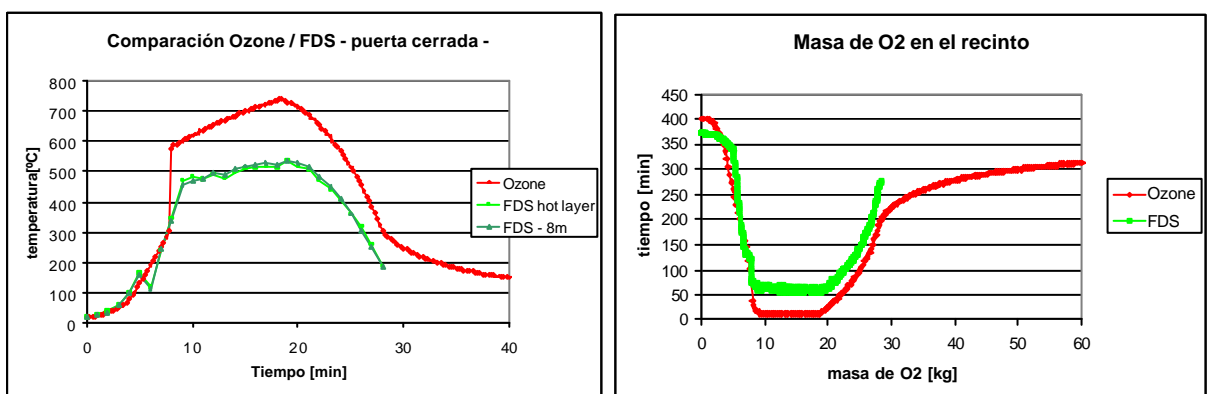


Figura 5-16: Comparación de los dos programas considerando un escenario con puerta cerrada.



En el programa Ozone, el único parámetro que permite influir sobre el tratamiento de las aperturas es el coeficiente de Bernoulli. Este coeficiente traduce el hecho que cruzando una apertura, los gases se comprimen y la velocidad del flujo no es tan importante que la calculada por la ecuación. Este coeficiente está siempre entre 0 (no flujo) y 1 (no pérdida de carga), su valor por defecto en el Ozone es 0,7.

Dado los resultados enseñados en la figura 5-16, la diferencia entre las temperaturas dadas por los dos modelos no parece ser únicamente debida al tratamiento de las oberturas de la fachada.

Hay muchas diferencias fundamentales entre estos dos modelos lo que implica muchas fuentes de dispersión entre los resultados. En la literatura, Ozone es reconocido para su capacidad de determinación del campo de temperatura muy cercana de los resultados obtenidos en pruebas reales. FDS es mucho más utilizado en problemas de circulación de humos y de propagación de incendios. En el estudio de la nave TIPO se consideraran los resultados de temperatura de zonas dados por el Ozone como referencia. Además, son los más desfavorables. El FDS estará utilizado para la observación y el análisis de problemas locales.

5.3 Análisis del caso de la nave TIPO

Una vez los dos códigos calibrados para el caso de la nave TIPO, hay que elegir los parámetros a estudiar. Se propone la lista siguiente:

- Influencia de la velocidad de liberación de calor
- Influencia de las aperturas; escenarios para la apertura de la puerta
- Influencia del nivel de riesgo intrínseco
- Influencia de la repartición de la carga de fuego
- Zonas de mayor temperatura



5.3.1 Influencia del RHR_{maxi}

El RHR_{maxi} [kW/m^2] es el parámetro lo más importante en la definición del fuego de cálculo. Define la velocidad de liberación de calor por unidad de superficie de fuego. Este valor, en el caso de un fuego determinado con el método del NFSC, condiciona la fase de combustión constante, durante cual se alcanza la temperatura máxima en la mayoría de los casos. La figura 5-17 enseña los resultados de una prueba realizada con Ozone, basada en el escenario ESCC3.

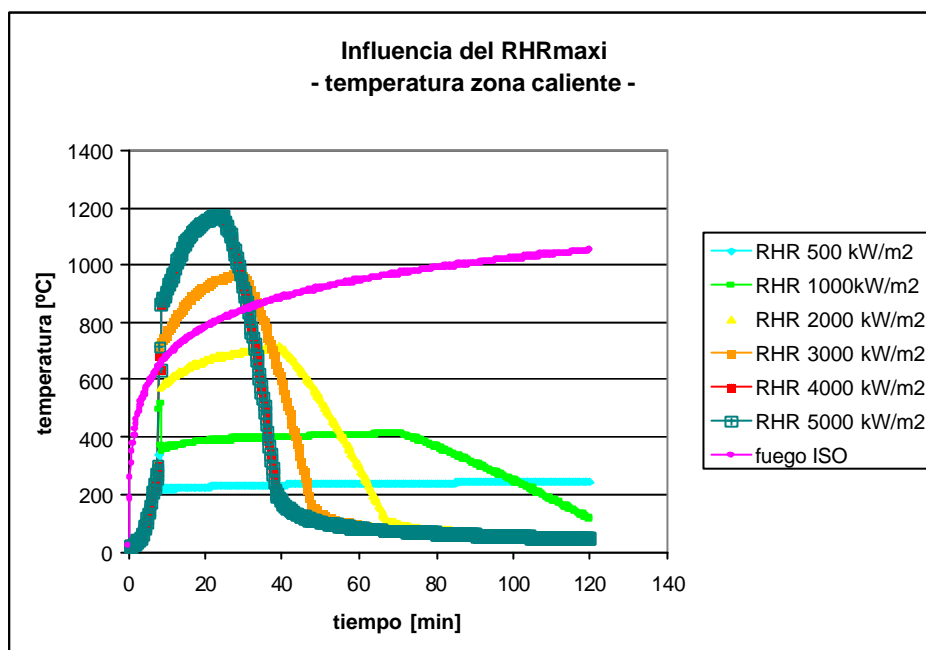


Figura 5-17: influencia de la velocidad de liberación de calor

Todas las curvas corresponden a la misma carga de fuego, repartida de la misma manera en el mismo recinto, con la misma configuración de las oberturas. Las diferencias muy grandes entre las diferentes temperaturas alcanzadas permiten enseñar la importancia capital de la determinación justa – y justificada – de este parámetro. En el anexo A de la normativa UNE 23.585 – Sistemas de control de calor y humos- [14] se pueden encontrar varios valores de RHR_{maxi} , dados con valor informativo:

- Para incendios sin rociadores:

$$RHR_{maxi, bajo} = 250 \text{ kW/m}^2$$

$$RHR_{maxi, alto} = 1250 \text{ kW/m}^2$$



- Para conjuntos de combustibles apilados entre 2 y 4m de altura h_c :

$$RHR_{\text{maxi, bajo}} = 250 \cdot (h_c - 1) \text{ kW/m}^2$$

$$RHR_{\text{maxi, alto}} = 1250 \cdot (h_c - 1) \text{ kW/m}^2$$

Dentro de los resultados principales de la simulación, el $RHR_{\text{tot}}(t)$ [MW], que se calcula como en la formula (E5-1), es el que tiene más influencia en la curva de temperatura. Este parámetro representa la velocidad total de liberación de calor instantánea en el recinto.

$$RHR_{\text{tot}}(t) = RHR_{\text{max}} \cdot A_f(t) \quad (\text{E5-1})$$

La figura 5-18 presenta las medidas de $RHR(t)$ de esta serie de pruebas.

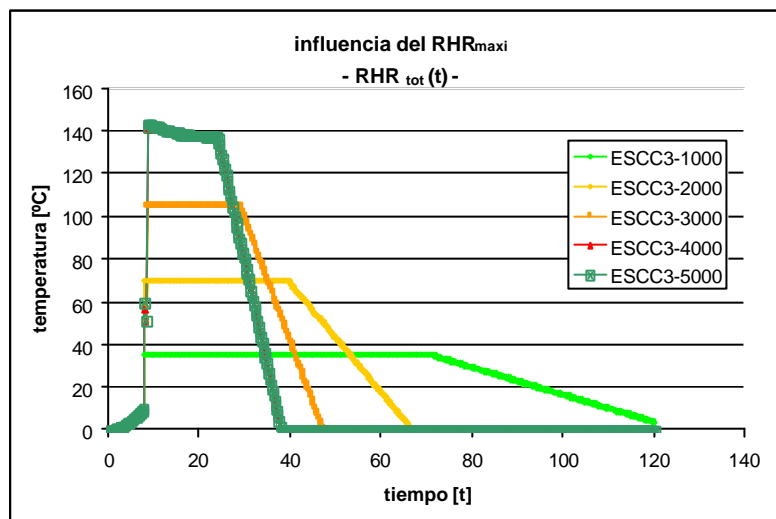


Figura 5-18: $RHR_{\text{tot}}(t)$ medido para diferentes valores de RHR_{maxi}

La primera constatación es que la aumentación del RHR_{maxi} produce a una aumentación de $RHR_{\text{tot, maxi}}$. Parece también que esta aumentación tiene un valor límite. Para interpretar estas curvas de manera correcta, hay consultar también las curvas representativas de la evolución del área de fuego y de la masa de oxígeno.



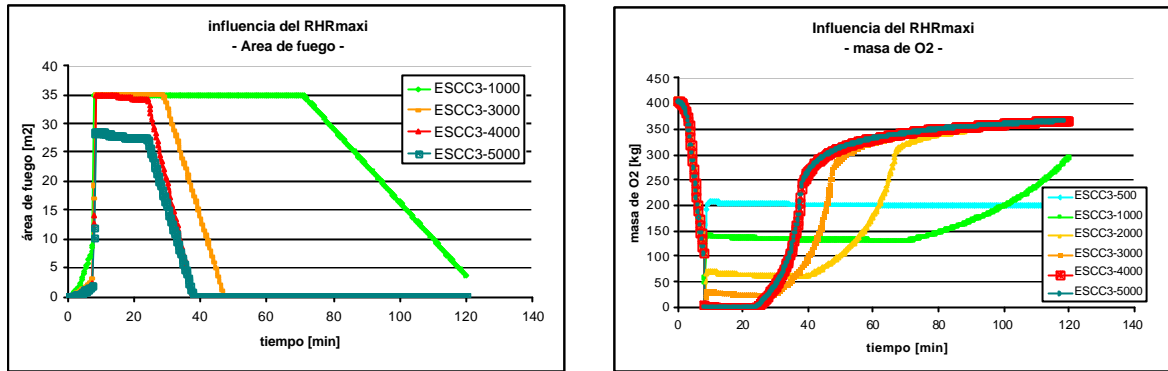


Figura 5-19: evolución del área de fuego y de la masa de oxígeno

En las simulaciones, se supone que el RHR_{maxi} tiene un valor fijo para cada tipo de combustible, y que la velocidad total de liberación de calor total depende de la superficie ocupada por el fuego (E5-1). Así, en el caso de un fuego controlado por el combustible, el $RHR_{tot,maxi}$ es alcanzado cuando el fuego se ha desarrollado hasta ocupar toda el área A_{cf} , área de carga de fuego. Esta bien normal en este caso que la aumentación de RHR_{maxi} lleva a una aumentación del $RHR_{tot,maxi}$, dado que la superficie A_{cf} sigue siendo idéntica.

El valor límite de $RHR_{tot,maxi}$ observado para los dos casos de mayor RHR_{maxi} (fig 5-18) corresponde a los casos para cuales la masa de oxígeno llega a 0kg. En estos casos el fuego es limitado por el oxígeno y la superficie instantánea de la zona de fuego no puede llegar a A_{cf} .

5.3.2 Influencia de las oberturas; escenarios para la obertura de la puerta

La presencia de oxígeno en el compartimiento es un parámetro clave en el desarrollo del fuego. Los elementos físicos que condicionan el suministro de oxígeno al fuego son las oberturas. La nave Tipo presenta 4 tipos de oberturas:

- El Colt, calibrado para abrirse a 70°C
- Los paneles de poliéster de la cubierta que funden a 150°C
- Las ventanas de cristal que explotan a 300°C
- La puerta metálica que aguanta temperaturas muy altas y que puede ser abierta o cerrada en cualquier momento

Así, además de ser la obertura la mas grande, la puerta es la única que se puede abrir o cerrar a petición en cualquier momento. Este constituye un elemento de escenario, el objetivo de este capítulo es de determinar su influencia en el desarrollo del fuego.



En una configuración como esta, el método de control del incendio por oxígeno no se aplica. Es un método bastante antiguo y adaptada a casos especiales como un incendio en un parking subterráneo. En el caso de la nave Tipo, lo normal para los bomberos sería de abrir la puerta para tener una zona clara y fría, debido a l' admisión de aire fresco, y entrar en el edificio para rociar la zona de fuego. Además, la puerta principal es también la única salida del edificio, y los ocupantes deberían abrirla para salir en caso de emergencia. En resumen se asume que, en todos los escenarios de fuego reales, la puerta acaba abierta. El caso de la puerta cerrada esta estudiado con valor de información, dado que el desarrollo completo del incendio sin intervención humana es muy poco probable.

El escenario de base utilizado para este estudio es el ESCC5 (nivel de riesgo 3, superficie de fuego 70m^2), con un RHR de 3000 kW/m^2 . Estas valores bastante elevadas permiten una buena visualización del cambio que produce la abertura de la puerta. Para la nomenclatura de los escenarios, el ultimo número es la fecha, en segundos desde el principio del incendio, de abertura de la puerta. Los resultados obtenidos son presentados en las figuras 5-20, 5-21 y 5-22.

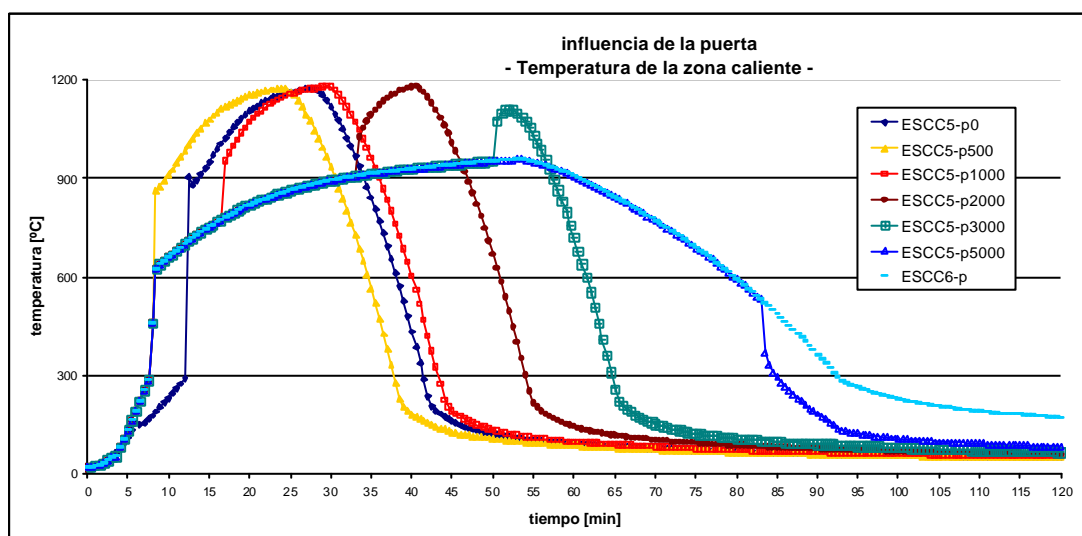


Figura 5-20: evolución de la temperatura de la zona caliente



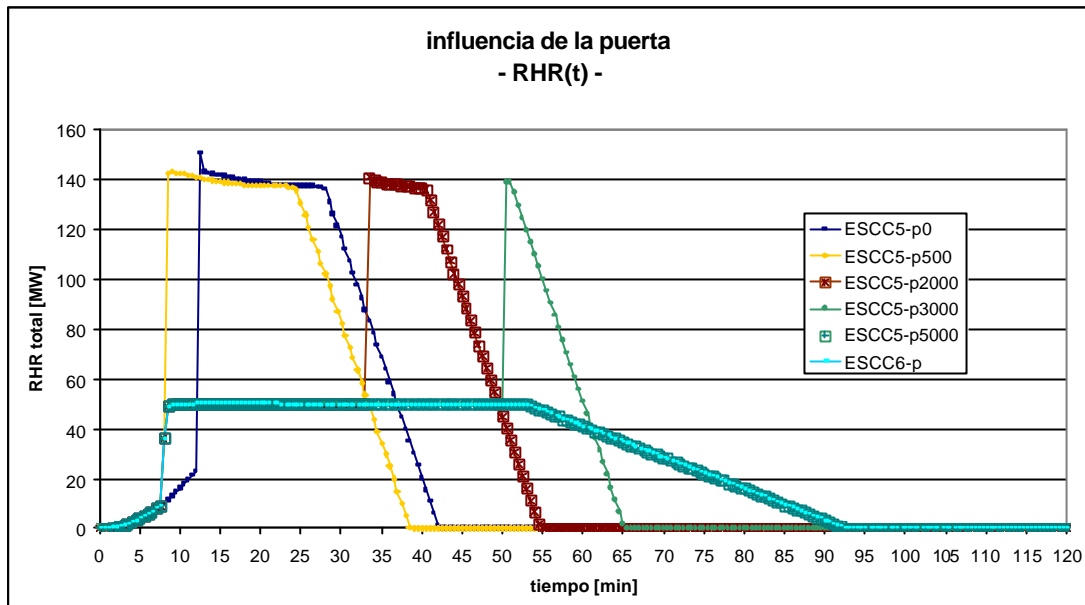


Figura 5-21: evolución de la velocidad de liberación de calor

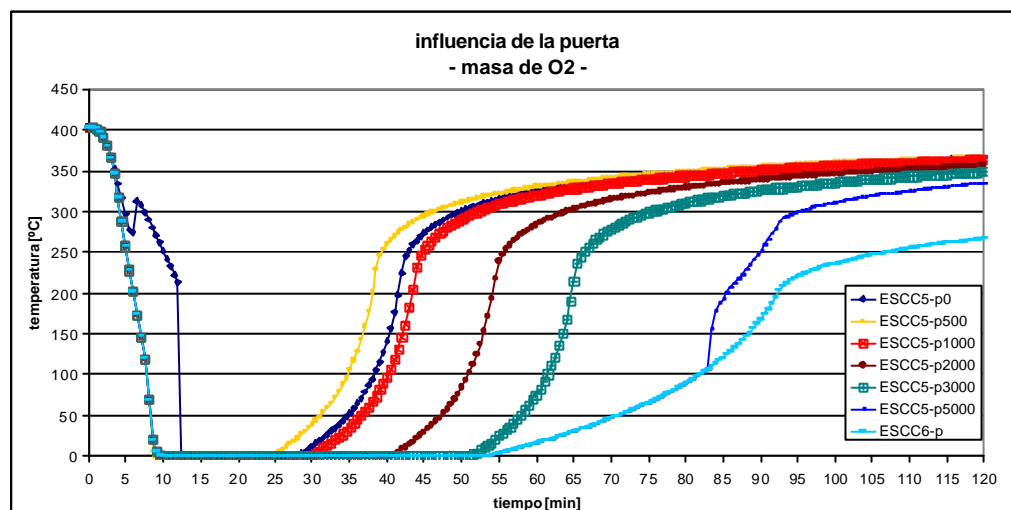


Figura 5-22: evolución de la masa de oxígeno

La primera constatación que se puede hacer es que, sin embargo, las curvas de temperatura siguen las curvas de velocidad de liberación de calor.

La curva de masa de oxígeno enseña que en todos los casos el fuego acaba controlado por el oxígeno, aún con la puerta abierta. La curva obtenida para el escenario ESC C5-p0, que tiene la puerta abierta desde el principio, permite notar la abertura del Colt y de los paneles de poliéster a 150°C. Esto permite la circulación de los gases. En los otros escenarios, este evento tiene poca influencia porque el hecho de tener aberturas únicamente en el techo no permite una grande circulación de aire. De todos modos, la



abertura de un elemento del techo no da lugar a una modificación puntual de la curva de temperatura. Estas aberturas sirven para evacuar los humos y los gases caliente fig (5-23). Esto limita la acumulación de calor bajo de la cubierta y permite bajar la temperatura máxima, pero como nunca entra aire fresco, no se nota en forma de “pic” en las curvas de temperatura. En el caso ESC C5-p500, la abertura de la puerta ocurre en el mismo momento que el flash-over, cuando la temperatura llega a $T_{fi} = 300^{\circ}\text{C}$ (ver capítulo 3.2.2). La aportación de aire fresco coincide con la ignición de la totalidad del combustible.

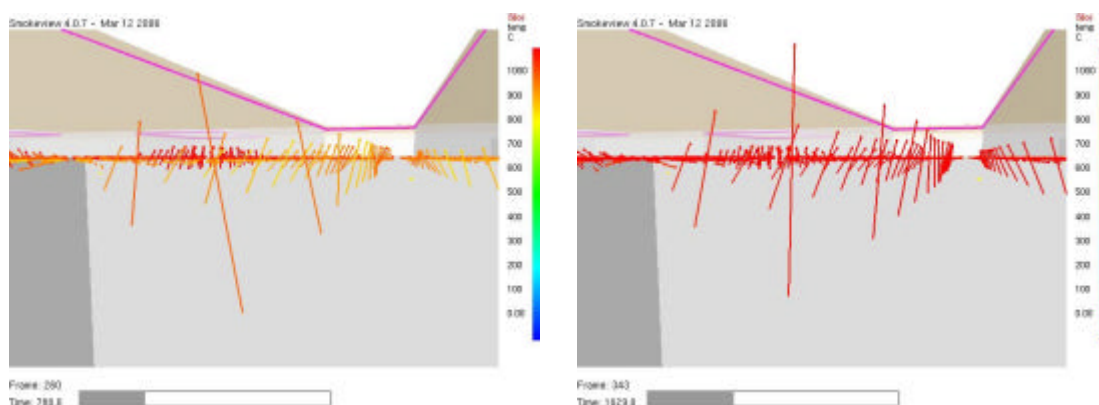


Figura 5-23: representación del flujo de gases a través las aberturas horizontales con vectores

Las curvas de $RHR_{tot}(t)$ enseñan la existencia de dos niveles de velocidad de liberación de calor. En este modelo de simulación, “Extended Fire Duration”, en caso de fuego controlado por oxígeno, el oxígeno que entra en el recinto esta directamente utilizado en la combustión. La admisión de más oxígeno permite quemar más combustible y aumenta el $RHR_{tot}(t)$. En los escenarios de categoría ESC C5, el fuego esta siempre limitado por el oxígeno, pero el RHR_{tot} presenta dos valores distintas según el estado de la puerta. El $RHR_{tot, max}$ es de 49.6MW con la puerta cerrada y de 140MW con la puerta abierta.

En el caso de un fuego controlado por combustible, el calor ya esta liberado con una velocidad igual a $RHR_{tot, max}$ multiplicado por A_{cf} y la aportación de aire fresco tiene como único efecto de enfriar el compartimiento. Esto se nota con el escenario ESC C5-p5000, la puerta se abre durante la fase de enfriamiento, cuando el fuego no esta más controlado por oxígeno.

La superficie bajo las curvas de $RHR_{tot}(t)$ es la misma en todos los casos dado que la carga de fuego sigue igual. La diferencia entre los escenarios es principalmente la duración de cada fase de la liberación de calor. En las curvas de temperaturas también aparece que existen dos niveles de temperatura alcanzados: el nivel alto – unos 1200°C – esta dado por los escenarios con la puerta abierta antes de 3000 segundos y el límite del



nivel bajo – unos 950°C - esta dado por el escenario ESC C6 que queda con la puerta cerrada.

Para no equivocarse en el análisis de este parámetro, hay que tener en cuenta algo que no aparece en estas simulaciones: la razón de la apertura de la puerta. En caso de permitir la evacuación de los ocupantes del edificio, la abertura de la puerta puede salvar vidas y se justifica en cualquier momento, aún si provoca una aumentación de la temperatura del incendio. Si la abertura es pedida por los bomberos, es que tienen la intención de disminuir la intensidad del fuego, y el campo de temperaturas resultante estará menos crítico que lo obtenido en estas simulaciones.

5.3.3 Influencia del nivel de riesgo intrínseco

Estudiar la influencia de la repartición de la carga de fuego es recoger una columna de la tabla (5-8). Se comparan los resultados obtenidos con el Ozone para los escenarios ESCA3, ESCB3, ESCE3 y ESCD3, con abertura de la puerta después de 500s y un RHR_{maxi} de 1250 kW/m². El nivel de riesgo intrínseco se define con respecto a la carga de fuego total, es decir a la energía total que se libera durante el incendio.

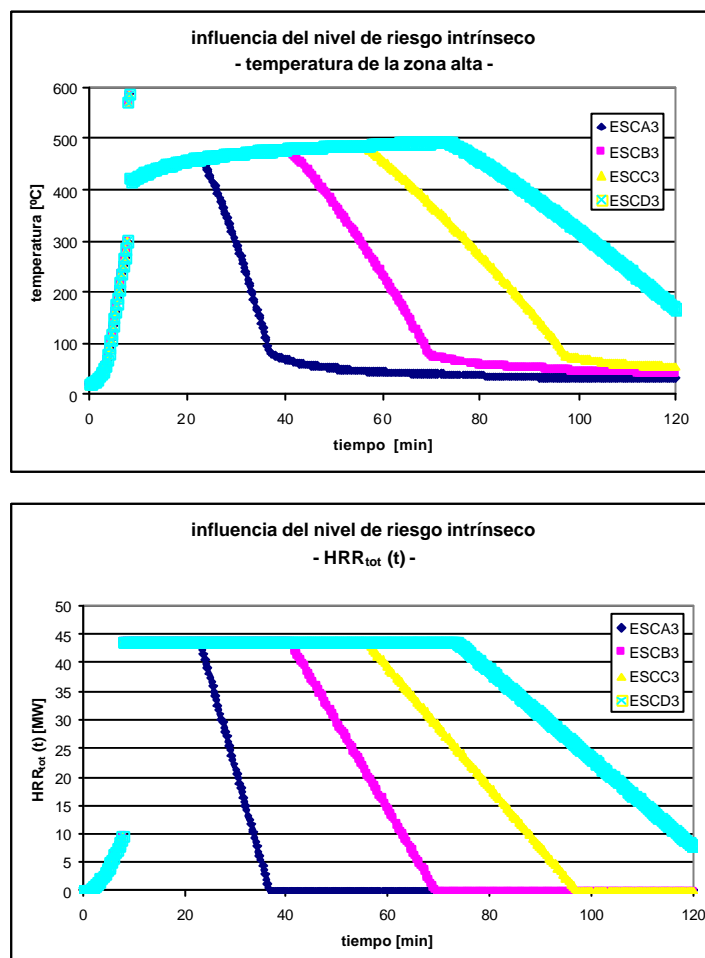


Figura 5-24: influencia del nivel de riesgo intrínseco



Los resultados de las simulaciones, presentados en la figura 5-24, enseñan que el nivel de riesgo intrínseco tiene sobre todo influencia en la duración del incendio.

Para todos estos escenarios, el fuego está controlado por el combustible y en su fase constante, el calor se libera con la velocidad RHR_{maxi} en toda la superficie ocupada por la carga de fuego, A_{cf} . Con un fuego controlado por oxígeno, los resultados son los mismos, dado que la velocidad de liberación de calor, aún que controlada por la aportación de oxígeno, es también constante.

El área bajo las curvas de liberación de calor está proporcional al nivel de carga de fuego. Por eso, dado que la velocidad máxima de liberación de calor es constante, hay que alargar la duración de esta liberación de calor para liberar toda la energía.

Las curvas de temperatura de zona alta enseñan que el nivel de riesgo intrínseco tiene poca influencia sobre la temperatura máxima. Es cierto que la temperatura la más alta fue alcanzada con el nivel de riesgo intrínseco el más elevado, pero la diferencia solo se hace durante la fase constante y no es muy grande. Entre los casos extremos ESCA3 y ESCD3, hay un ratio de 4 entre los niveles de carga de fuego pero la diferencia de temperatura máxima alcanzada no excede 10%. El ratio de 4 se encuentra en las duraciones de liberación de calor.

Se nota también que, con el modelo de diseño de fuegos de cálculo NFSC, una aumentación del nivel de carga de fuego no solamente alarga la fase constante, pero también la fase de enfriamiento.

5.3.4 Influencia de la repartición de la carga de fuego

Estudiar la influencia de la repartición de la carga de fuego es recoger una línea de la tabla (5-8). Se comparan los resultados obtenidos con el Ozone para los escenarios ESCC1, 3, 5 y 7, con abertura de la puerta después de 500s y un RHR_{maxi} de 3000 kW/m^2 . El nivel de riesgo intrínseco en el edificio se conserva, lo único que cambia es la superficie ocupada por el fuego. Para conseguir esto hay que disminuir la densidad de carga de fuego a medida que se aumenta la superficie la carga de fuego, dado que el nivel de riesgo intrínseco es pendiente de la carga de fuego total dividida por la superficie del suelo del edificio (tabla 5-9 ; ecuación E5-1).



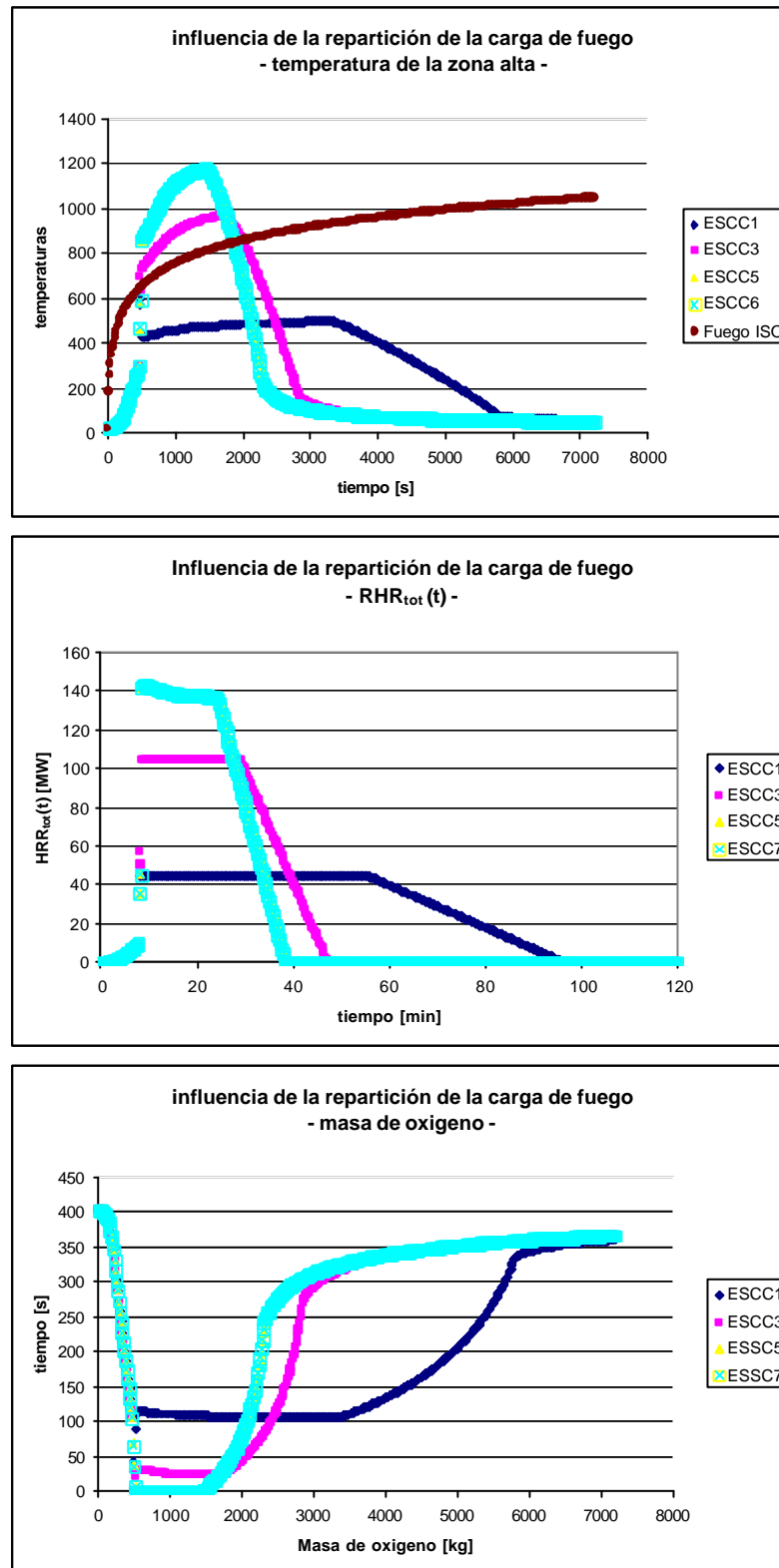


Figura 5-25: influencia de la repartición de la carga de fuego



La superficie bajo curva de las curvas de velocidad de liberación de calor es la misma en todos los casos dado que la carga de fuego total es igual. La curva de temperatura es directamente pendiente de la velocidad de liberación de calor. En los casos ESCC1 y ESCC3, el valor máximo de RHR_{total} alcanzado corresponde a la velocidad máxima de liberación de calor multiplicada por el área máxima del fuego, el fuego está controlado por el combustible. En los casos ESCC5 y ESCC7, la liberación de calor esta limitada por el oxígeno presente en el edificio, los dos casos tienen la misma curva de velocidad de liberación de calor. El $RHR_{tot}(t)$ llega a un valor máximo de 140 MW.

La influencia de la repartición de la carga de fuego puede resumirse así:

Para un RHR_{maxi} y un nivel de riesgo intrínseco dados, una superficie de fuego más grande permite más liberación instantánea de calor y lleva a una temperatura mas elevada, durante un tiempo mas corto.

Una vez alcanzado el límite del control por oxígeno, la superficie de combustible que quema a un instante t queda constante. El fuego sigue quemando con el RHR_{maxi} pero en un área limitada.

5.3.5 Zonas de temperatura máxima

El programa Ozone solo da sus resultados bajo la forma de temperatura homogenea de la zona caliente. Para determinar las zonas de máxima temperatura, hay que utilizar una simulación mediante FDS que permite medir la temperatura instantanea en muchos puntos localizados.

La nave tipo está dividida en 6 zonas (fig(5-26)), y en cada zona se mide la temperatura a una altura de 9m del suelo.

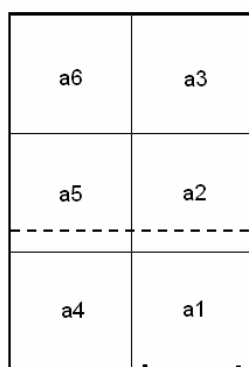


Figura 5-26: división de la nave en seis zonas



Las curvas de temperatura obtenidas para los seis puntos de medida son comparadas entre ellas, y también con las temperaturas de zona caliente dadas por Ozone y FDS. La comparación se hace siguiendo los escenarios ESCB3 y ESCB4, con un riesgo intraseco de nivel 2, una carga de fuego repartida en una zona de 35m^2 y un RHR_{maxi} de 1250 kW/m^2 .

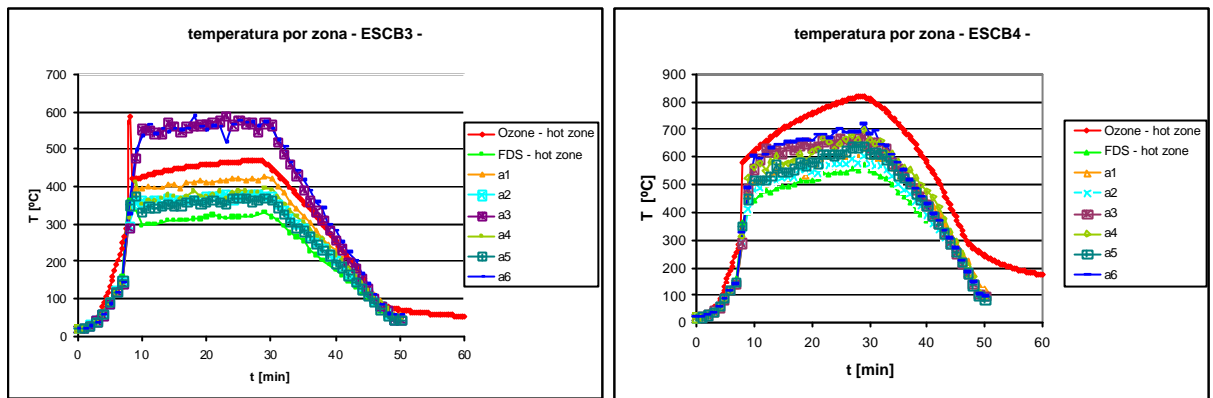


Figura 5-27: temperaturas en las diferentes zonas

En el primer caso, escenario ESCB3, la puerta se abre después de 500s. La aportación masiva de aire crea muchas turbulencias, lo que implica una dispersión bastante importante de las temperaturas en las diferentes zonas. Las temperaturas las más críticas son alcanzadas en las zonas del fondo, que quedan más lejos de la entrada de aire fresco. En este caso, el FDS enseña la presencia de zonas donde se alcanzan temperaturas aún más elevadas que la temperatura de zona caliente dada por el Ozone.

En el segundo caso, ESCB4, la puerta queda cerrada. Esta limitación de la circulación de aire nos da una distribución más homogénea de las temperaturas en el compartimento. En este caso, Ozone da una temperatura homogénea de zona alta más elevada que todas las medidas de FDS.

En cada uno de los ensayos, la temperatura media de zona caliente calculada por FDS queda más baja que la temperatura de los seis puntos de medida situados a 9m de altura. Esto enseña que, aún que el modelo por zona sigue valable para modelizar el campo de temperaturas, existe un gradiente a l'interior de cada zona. Las temperaturas las más elevadas se encuentran cerca del techo.

La presencia del altillo es también una fuente de preocupación en el tema de acumulación de calor. Se hace otra prueba con dos captores de temperatura en las zonas a1 y a4 a una altura $h = 4,3\text{m}$. Los resultados, enseñados en la figura (5-28), comparan estas temperaturas con la temperatura en el centro del recinto a una altura de 8m.



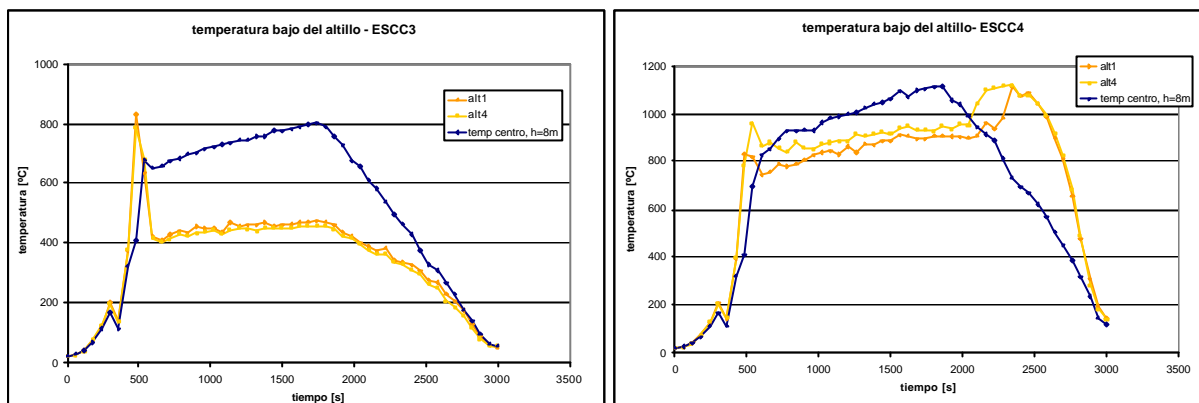


Figura 5-28: temperaturas bajo del altillo

En el escenario ESCB3, la influencia de la puerta como entrada de aire fresco se nota mucho. Las temperaturas medidas bajo del altillo son bastante baja comparadas con las de la zona caliente.

En el caso del escenario ESCB4, se nota otra vez que cuando la puerta esta cerrada las temperaturas son más homogéneas en el recinto. La acumulación de calor la más crítica se produce al final del incendio, durante la fase de enfriamiento. Con la puerta abierta, está bien claro que el aire fresco entra por la puerta, se calienta y sale por las aberturas del techo y las ventanas. Con la puerta cerrada, el corriente de aire no esta tan fuerte. El aire fresco entra por las ventanas y sale por las aberturas del techo. En la zona baja del recinto, el corriente es débil y mal definido, con turbulencias. Cuando la fase de enfriamiento empieza, el caudal de evacuación del aire caliente por las aberturas del techo disminuye, y el efecto de succión asociado también. La masa de gases calientes que sobra bajo del altillo no esta influenciada por ningún corriente, intenta subir verticalmente y queda bloqueada por el altillo como lo ilustra la figura 5-29.

De todos modos, las temperaturas alcanzadas bajo del altillo no son mucho mayores que en el resto de la estructura y esta zona no constituye realmente un punto crítico.



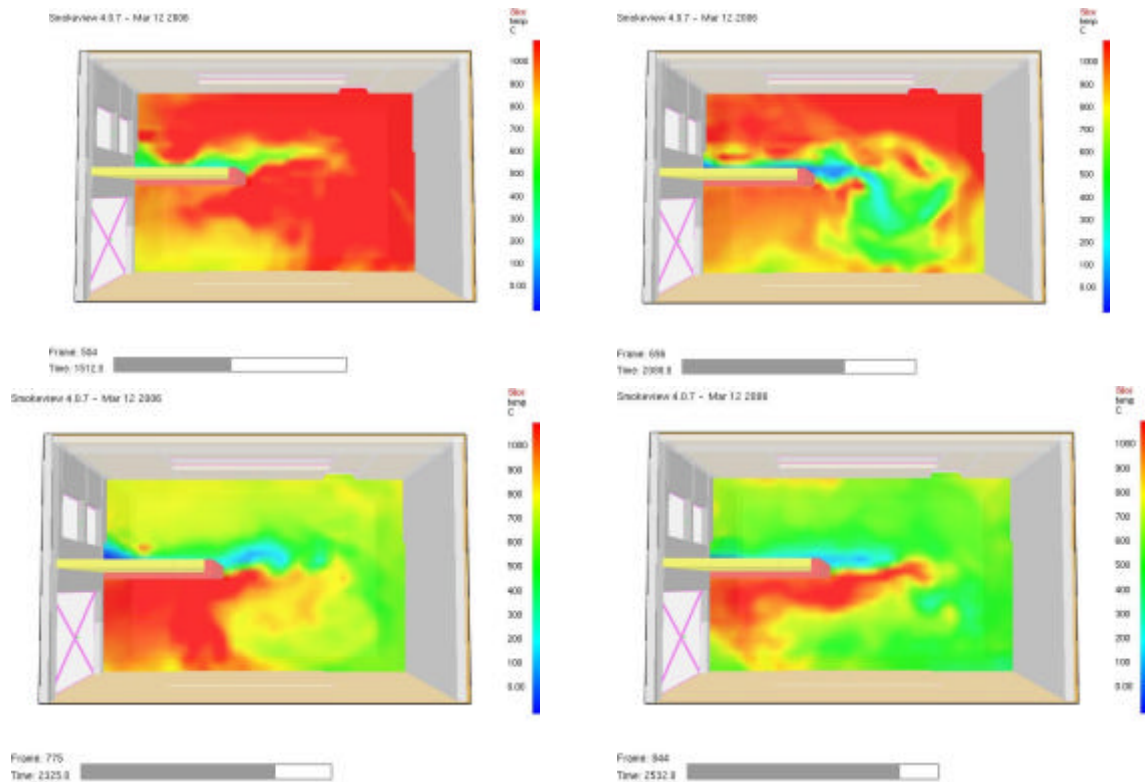


Figura 5-29:evolucion de las temperaturas bajo del altillo en el ESCB4

5.3.6 Análisis global de los resultados

El análisis de la influencia de cada parámetro enseña que, cada vez, se puede alcanzar el valor límite de velocidad de liberación de calor que lleva a una temperatura muy elevada en el recinto. Un solo parámetro no permite determinar el nivel de peligro que representa un fuego.

Aún que sea la manera las más utilizada para clasificar los incendios, se ha enseñado que el nivel de carga de fuego solo tiene influencia en la duración del incendio y no en la temperatura alcanzada. La temperatura es muy ligada con la velocidad total de liberación de calor, $RHR_{tot}(t)$, que depende tanto de la naturaleza del combustible (RHR_{maxi}) y de su configuración (A_{cf}) como del oxígeno disponible en el recinto. La caracterización y la modelización de un incendio real es un problema complejo y necesita un buen conocimiento del recinto y del combustible para ser representativo de la realidad. En el caso de la nave TIPO, se quería estudiar el edificio en general, sin conocer con exactitud la actividad. Por eso, se han estudiado muchos escenarios diferentes con un rango muy amplio de variaciones de los diferentes parámetros. Las diferentes



simulaciones no llegan realmente a un conjunto de conclusiones cuantitativas, pero permiten visualizar y entender la influencia de cada parámetro en la evolución del incendio.

Algunos valores son aún importantes de notar: Los valores máximos de RHR_{tot} según la configuración de la puerta y sus temperaturas límites asociadas. De hecho, estos valores son propiedades del recinto y representan valores límites para cualquier tipo de combustible.

En posición puerta cerrada, el RHR_{tot} alcanza los 49,6 MW con una temperatura límite cerca de 950°C, y con la puerta abierta, el RHR_{tot} alcanza los 140 MW con una temperatura límite cerca de 1200°C. Este valor de temperatura es muy elevado y se considera un valor límite para este edificio. De acuerdo con un experto de bomberos, en caso de incendios reales en este tipo de naves, las temperaturas máximas quedan del orden de los 900°C.



Conclusiones

El estudio y la modelización de los incendios reales en recintos industriales pertenecen a un campo bastante reciente de la ingeniería de la seguridad. La etapa de la determinación del campo de temperatura es muy importante dado que es el punto de inicio de los otros estudios que pueden hacerse sobre un incendio.

La primera etapa fue de entender el fenómeno de fuego, e de identificar, en el caso de un incendio real en un recinto industrial, los parámetros importantes para analizar su influencia. El fuego es un fenómeno destructivo y que depende de muchos parámetros, como el combustible, el recinto y el medio ambiente. Existen muchos informes de pruebas realizadas para caracterizar la combustión de objetos particulares en rangos limitados de condiciones, pero el fuego es un fenómeno tan sensible que es difícil encontrar información general. La modelización de un incendio real solamente puede hacerse mediante la identificación y la cuantificación de todos los parámetros influyentes, es decir mediante la definición de un escenario de incendio.

La necesidad de definir un escenario para el incendio real induce la necesidad de hacer algunas hipótesis simplificadoras. De manera general, la definición del recinto y del medio ambiente es bastante clara, dado que sus características son conocidas o pueden ser medidas fácilmente. La parte mas difícil es la caracterización del combustible. Por su naturaleza accidental, el incendio implica a menudo, como combustibles, objetos que no han sido creados para ser combustibles. Resulta que la carga total de fuego es un conjunto de elementos combustibles muy diversos, con unos comportamientos al fuego diferentes. Utilizando bases de datos o nuevas pruebas, debe intentarse, para cada aplicación particular, determinar las características de la carga de fuego resultante.

Una vez conocidas las condiciones y los parámetros del incendio real, la elección del modelo de simulación depende de su campo de aplicación y de la naturaleza del resultado esperado. Las antiguas curvas de fuego nominal ISO, aunque se siguen utilizando, son una representación poco realista de lo que ocurre durante un fuego. El objetivo de este proyecto era buscar, analizar y entender otros modelos existentes para determinar la evolución del campo real de temperaturas durante un incendio, y aplicarlos a un caso real de nave industrial. Algunos métodos analíticos, como las curvas paramétricas, permiten modelizar el fuego de manera muy sencilla, pero quedan bastante lejos de la realidad dado que se tienen pocos parámetros en cuenta. Se pueden utilizar para los casos de fuego real similar al fuego celulósico estándar y para recintos de dimensiones limitadas. Los modelos numéricos, considerando los progresos de los programas informáticos, aparecen como la mejor solución para una modelización completa de los incendios



reales. Los modelos por zonas, como el Ozone, permiten una determinación rápida del campo de temperatura durante el incendio. Estos modelos no permiten tratar las singularidades de la carga de fuego ni localizar las zonas más críticas. Este problema parecía resuelto con los modelos de mecánica computacional de fluidos, como FDS, dado que permiten definir la naturaleza de cada elemento finito. Al principio de este proyecto, uno de los objetivos era el desarrollo de un escenario real completo, con representación realista de la carga de fuego, elemento por elemento, ignición puntual del fuego y estudio de la propagación, ya que por falta de datos, esta parte del objetivo no fue alcanzada. Este tipo de simulación requiere un conocimiento preciso del comportamiento de cada material. Además en la rejilla de elementos finitos, cada elemento tiene propiedades homogéneas y la modelización de un objeto real puede necesitar una rejilla muy fina. Al final FDS solamente fue utilizado para simular fuegos prescritos con el método del NFSC.

El estudio del caso particular de la nave TIPO enseña que aunque el desarrollo del incendio depende principalmente de la carga de fuego, las temperaturas alcanzadas y la liberación total de calor del fuego son limitadas por las características del recinto. Este estudio permitió determinar estos valores límites para la nave TIPO sin conocer la naturaleza de la carga de fuego. Es importante insistir en el hecho que estos valores son límites altos y solamente serán alcanzados en pocos casos reales.



Agradecimientos

A todas las personas que me han permitido hacer este proyecto y me han ayudado en su finalización, y en particular a: F. Marimon, X. Lacroisette, F. Balletbo, T. Armengou, J.M. Franssen, F. González, S. Rovira y J. Axelsson.



Bibliografía

Referencias bibliográficas

- [1] J Mehaffey, D Joyeux, JM Franssen, MBN Horasan, LBEIN, *Guía de Diseño para la seguridad ante incendio en edificios industriales*. 2002
- [2] J.B. Schleich, *Proyecto de valorización : Concepto de Seguridad frente a Fuego real*, 2001
- [3] SP Swedish National Testing and Research Institute, *SP Fire Data Base* , <http://www.sp.se>
- [4] J-F Cadorin, *Compartment Fire Models for Structural Engineering*, Université de Liège, 2003
- [5] Col·legi oficial d'Enginyers Industrials de Catalunya, *Reglamento de Seguridad contra Incendios en los Establecimientos Industriales*, 2005
- [6] AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación, *UNE-UN 1991-1-2:2004, Acciones en Estructuras expuestas al Fuego*, 2004
- [7] P. Vila Real, *Incendio em Estruturas Metálicas – cálculo estrutural*, Ediciones Orion, 2003
- [8] Olenick, Stephen M., and Carpenter, Douglas J., "An Updated International Survey of Computer Models for Fire and Smoke," *SFPE Journal of Fire Protection Engineering*, 13 (2), 2003, p. 87-110. <http://www.firemodelsurvey.com/Olenick.html>
- [9] J-F Cadorin, D Pintea, J-M Franssen, *The Design Fire tool Ozone V2.0- Theoretical description and Validation On Experimental Fire Tests*, Université de liège, 2001
- [10] Université de Liège, département de Mécanique des Matériaux et Structures, téléchargements, <http://www.ulg.ac.be/matstruc/Download.html>
- [11] Nacional Institute of Standards and Technology, FDS and SmokeView home page <http://www.fire.nist.gov/fds/>
- [12] Kevin McGrattan, *Fire Dynamic Simulator (Version4) – Technical Referente Guide*, NIST special edition 1018, Marzo 2006



- [13] Kevin McGrattan, *Fire Dynamic Simulator (Version4) – User's Guide*, NIST special edition 1019, Marzo 2006
- [14] AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación, *UNE 23.585, Sistemas de Control de Calor y Humos*, mayo 2000

Bibliografía complementaria

- [15] Manuel Pascual Pons, *Tecnología del fuego*, abril 1977

Presentación general del fenómeno de fuego, desarrollo de conceptos de base.

- [16] Luis L. Herrera Zogby, *La prevención de Daños por Incendios en Arquitectura*, ediciones LIMUSA, 1981

Presentación de soluciones arquitecturales de seguridad contra incendio, evaluación del riesgo y elección de las soluciones

- [17] V. Babrauskas, *Will the Second Item Ignite?*, US Department of Commerce – National Bureau of standards, mayo 1981

Estudio sobre las posibilidades de ignición de un objeto por otro (propagación del fuego en presencia de varios combustibles)

- [18] Jonathan F. Nyman, *Equivalent Fire Resistance Ratings of Construction Elements Exposed to Realistic Fires*

Resumen de varios ensayos de fuegos reales, comparación con los fuegos nominales.

- [19] V. Babrauskas, fire publications <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/fireall/auth/auth41.html>

Varias publicaciones del profesor Babrauskas sobre sus experimentaciones en los incendios reales





Anexo A

Curvas paramétricas

El Anexo A es la presentación del trabajo hecho en el tema de las curvas paramétricas. El principal límite de la utilización de este método en este proyecto es que la nave Tipo tiene dimensiones fuera de su campo de aplicación.

Se ha realizado una hoja de cálculo Excel que permite aplicar el método descrito en el capítulo 4.1.2.

El primer ejemplo presentado es el ejemplo de un recinto pequeño, como una habitación de hotel, que sirve de ejemplo en el libro de P.Vila Real [7]

Después se presenta **con valor informativo** el caso de la nave TIPO con una carga de fuego correspondiente a un riesgo intrínseco de nivel 4. El resultado está comparado con la curva de fuego nominal ISO. Este ejemplo no tiene realmente mucho valor al nivel de la investigación dado que la nave TIPO queda fuera de las dimensiones límite de aplicación de este modelo.



Ejemplo 2.2 del libro de P. Vila Real, *Incendio em Estruturas Metálicas – cálculo estrutural* [7]. Habitación de hotel.

Método analítico de determinación de la temperatura por curvas paramétricas

Limitaciones :

Edificios de superficie inferior a 500m² y de altura de techo menor de 4m.
Este metodo solo lleva en cuenta las aperturas verticales.

Definicion del recinto:

nave X = 4 m
 Y = 5 m
 Z = 3 m

Aperturas verticales

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	
Altura Hi	2	0							m
Anchura Bi	3	0							m

propiedades de las paredes :

Massa especifica ρ = 2300 kg/m³
Capacidad calorifica c = 1000 kJ/kg.K
Conductividad λ = 1,6 W/m.K

Parametros del calculo :

factor b $b = \sqrt{\rho \cdot c \cdot \lambda} = 1918 \text{ J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}$

Area del suelo $A_f = 20 \text{ m}^2$

Area total de paredes $A_t = 94 \text{ m}^2$

Area Aperturas $A_v = \sum H_i \cdot B_i = 6 \text{ m}^2$

Media pesada de
altura de las aperturas $h_{eq} = \sum H_i \cdot A_i / \sum A_i = 2 \text{ m}$

Factor de aberturas $O = A_v \cdot \sqrt{h_{eq}} / A_t = 0,09 \text{ m}^{1/2}$

Parametro Γ $\Gamma = [O/b]^2 / (0,04/1160)^2 = 1,862$



Fase de crecimiento :

Temperatura : $\theta_g = 20 + 1325 \cdot (1 - 0,324e^{-0,2t^*} - 0,204e^{-1,7t^*} - 0,472e^{-19t^*})$

Carga de fuego (determinada según la actividad) : $q_{f,d} = 800 \text{ MJ/m}^2$

Carga de fuego respecto a la superficie total :

$$q_{t,d} = q_{f,d} \times A_f / A_t = 170,21 \text{ MJ/m}^2$$

Velocidad de propagación del incendio :

media $t_{lim} = 20 \text{ min}$
 $= 0,3333 \text{ h}$

Tiempo de llegada a θ_{max} :

$$t_{max} = \max[(0,2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d} / O) ; t_{lim}] = 22,6 \text{ min}$$

$$= 0,3771 \text{ h}$$

Si $t_{max} = t_{lim}$, calculamos

$$O_{lim} = 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d} / t_{lim} = 0,1021 \text{ m}^{1/2}$$

$$\Gamma = [O_{lim} / b]^2 / (0,04 / 1160)^2 = 2,3836$$

t_{max} fictivo :

$$t^* = t \cdot \Gamma$$

$$t^*_{max} = t_{max} \cdot \Gamma = 42,1 \text{ min}$$

$$= 0,7023 \text{ h}$$

Temperatura maxi :

$$\theta_{max} = 885,83 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Fase de decrecimiento :

Temperatura :

$$\theta_g = \theta_{max} - 625(t^* - t^*_{max} \cdot x) \text{ si } t^*_{max} \leq 0,5h$$

$$\theta_g = \theta_{max} - 250(3 - t^*_{max} \cdot x)(t^* - t^*_{max} \cdot x) \text{ si } 0,5 \leq t^*_{max} \leq 2h$$

$$\theta_g = \theta_{max} - 250(t^* - t^*_{max} \cdot x) \text{ si } t^*_{max} \geq 2h$$

donde

$$t^* = t \cdot \Gamma$$

$$t^*_{max} = (0,2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d} / O) \cdot \Gamma$$

$$x = 1 \text{ si } t_{max} \geq t_{lim} \text{ o } x = t_{lim} \cdot \Gamma / t^*_{max} \text{ si } t_{max} = t_{lim}$$

velocidad de decrecimiento

$$V_d = -1069,7 \text{ } ^\circ\text{C/h}$$

Tiempo para llegar a 20°C :

$$t_d = 0,809 \text{ h}$$

Tiempo total del incendio :

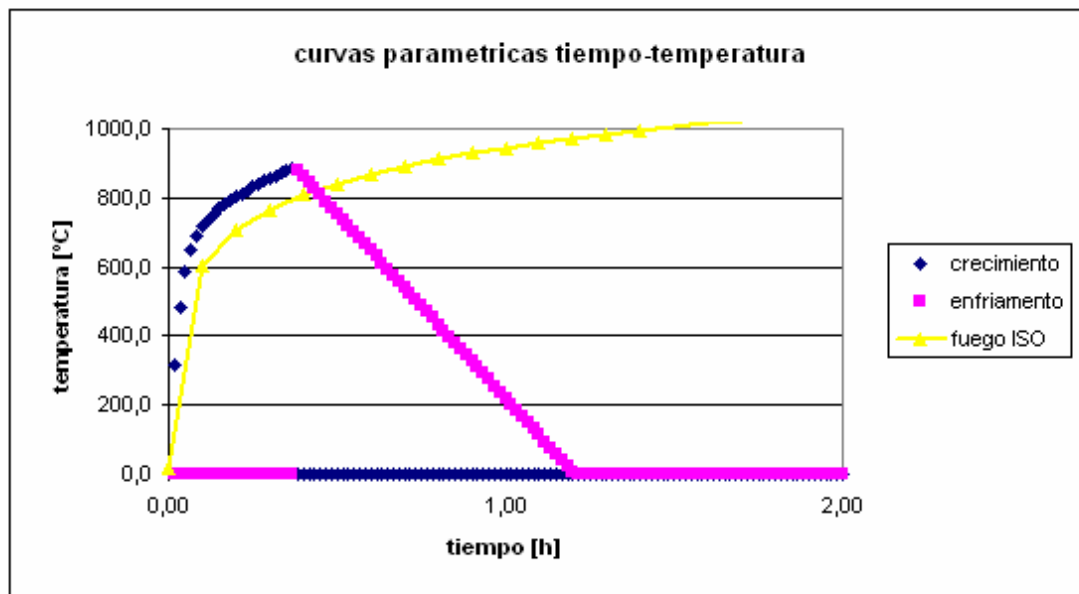
$$T_{total} = 1,2 \text{ h}$$

$$71,2 \text{ min}$$



t*	t	θ_g	θ_g	θ_g	t*	t	θ_g	θ_g	θ_g
0,03	0,02	315,2			2,02	1,08		130,4	130,4
0,06	0,03	485,5			2,05	1,10		112,6	112,6
0,09	0,05	586,3			2,08	1,12		94,7	94,7
0,12	0,07	648,2			2,11	1,13		76,9	76,9
0,16	0,08	688,4			2,14	1,15		59,1	59,1
0,19	0,10	716,3			2,17	1,17		41,3	41,3
0,22	0,12	737,0			2,20	1,18		23,4	23,4
0,25	0,13	753,7			2,23	1,20		5,6	5,6
0,28	0,15	767,8			2,27	1,22			
0,31	0,17	780,3			2,30	1,23			
0,34	0,18	791,8			2,33	1,25			
0,37	0,20	802,5			2,36	1,27			
0,40	0,22	812,6			2,39	1,28			
0,43	0,23	822,1			2,42	1,30			
0,47	0,25	831,3			2,45	1,32			
0,50	0,27	840,0			2,48	1,33			
0,53	0,28	848,4			2,51	1,35			
0,56	0,30	856,5			2,54	1,37			
0,59	0,32	864,3			2,58	1,38			
0,62	0,33	871,7			2,61	1,40			
0,65	0,35	878,9			2,64	1,42			
0,68	0,37	885,8			2,67	1,43			
0,71	0,38		879,2	879,2	2,70	1,45			
0,74	0,40		861,4	861,4	2,73	1,47			
0,78	0,42		843,5	843,5	2,76	1,48			
0,81	0,43		825,7	825,7	2,79	1,50			
0,84	0,45		807,9	807,9	2,82	1,52			
0,87	0,47		790,0	790,0	2,86	1,53			
0,90	0,48		772,2	772,2	2,89	1,55			
0,93	0,50		754,4	754,4	2,92	1,57			
0,96	0,52		736,6	736,6	2,95	1,58			
0,99	0,53		718,7	718,7	2,98	1,60			
1,02	0,55		700,9	700,9	3,01	1,62			
1,06	0,57		683,1	683,1	3,04	1,63			
1,09	0,58		665,2	665,2	3,07	1,65			
1,12	0,60		647,4	647,4	3,10	1,67			
1,15	0,62		629,6	629,6	3,13	1,68			
1,18	0,63		611,8	611,8	3,17	1,70			
1,21	0,65		593,9	593,9	3,20	1,72			
1,24	0,67		576,1	576,1	3,23	1,73			
1,27	0,68		558,3	558,3	3,26	1,75			
1,30	0,70		540,4	540,4	3,29	1,77			
1,33	0,72		522,6	522,6	3,32	1,78			
1,37	0,73		504,8	504,8	3,35	1,80			
1,40	0,75		487,0	487,0	3,38	1,82			
1,43	0,77		469,1	469,1	3,41	1,83			
1,46	0,78		451,3	451,3	3,45	1,85			
1,49	0,80		433,5	433,5	3,48	1,87			
1,52	0,82		415,6	415,6	3,51	1,88			
1,55	0,83		397,8	397,8	3,54	1,90			
1,58	0,85		380,0	380,0	3,57	1,92			
1,61	0,87		362,2	362,2	3,60	1,93			
1,64	0,88		344,3	344,3	3,63	1,95			
1,68	0,90		326,5	326,5	3,66	1,97			
1,71	0,92		308,7	308,7	3,69	1,98			
1,74	0,93		290,8	290,8	3,72	2,00			
1,77	0,95		273,0	273,0	3,76	2,02			
1,80	0,97		255,2	255,2	3,79	2,03			
1,83	0,98		237,4	237,4	3,82	2,05			
1,86	1,00		219,5	219,5	3,85	2,07			
1,89	1,02		201,7	201,7	3,88	2,08			
1,92	1,03		183,9	183,9	3,91	2,10			
1,96	1,05		166,1	166,1	3,94	2,12			
1,99	1,07		148,2	148,2	3,97	2,13			





Caso de la nave TIPO – con valor informativo -

Método analítico de determinación de la temperatura por curvas paramétricas

Limitaciones :

Edificios de superficie inferior a 500m² y de altura de techo menor de 4m.
Este método solo lleva en cuenta las aperturas verticales.

Definición del recinto:

nave X = 15 m
 Y = 10,2 m
 Z = 9,5 m **! Fuera del campo de aplicación !**

Aperturas verticales

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	
Altura Hi	1,7	4							m
Anchura Bi	4	4							m

propiedades de las paredes :

Massa específica ρ = 2100 kg/m³
Capacidad calorífica c = 880 kJ/kg.K
Conductividad λ = 1 W/m.K

Parámetros del cálculo :

factor b $b = \sqrt{\rho \cdot c \cdot \lambda} = 1359 \text{ J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}$

Area del suelo $A_f = 153 \text{ m}^2$

Area total de paredes $A_t = 784,8 \text{ m}^2$

Area Aperturas $A_v = \sum H_i \cdot B_i = 22,8 \text{ m}^2$

Media pesada de
altura de las aperturas: $h_{eq} = \sum H_i \cdot A_i / \sum A_i = 3,314 \text{ m}$

Factor de aberturas $O = A_v \cdot \sqrt{h_{eq}} / A_t = 0,053 \text{ m}^{1/2}$

Parametro Γ $\Gamma = [O/b]^2 / (0,04/1160)^2 = 1,273$



Fase de crecimiento :

Temperatura : $\theta_g = 20 + 1325 \cdot (1 - 0,324e^{-0,2t^*} - 0,204e^{-1,7t^*} - 0,472e^{-19t^*})$

Carga de fuego (determinada según la actividad) : $q_{f,d} = 1500 \text{ MJ/m}^2$

Carga de fuego respecto a la superficie total :

$$q_{t,d} = q_{f,d} \times A_f / A_t = 292,43 \text{ MJ/m}^2$$

Velocidad de propagación del incendio : **rapida**

$$t_{lim} = 15 \text{ min} \\ = 0,25 \text{ h}$$

Tiempo de llegada a θ_{max} : $t_{max} = \max[(0,2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d} / O) ; t_{lim}] = 66,4 \text{ min}$
 $= 1,10586 \text{ h}$

Si $t_{max} = t_{lim}$, calculamos

$$O_{lim} = 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d} / t_{lim} = 0,23394 \text{ m}^{1/2}$$

$$\Gamma = [O_{lim} / b]^2 / (0,04 / 1160)^2 = 24,907$$

t_{max} fictivo :

$$t^* = t \cdot \Gamma$$

$$t^*_{max} = t_{max} \cdot \Gamma = 84,5 \text{ min} \\ = 1,40767 \text{ h}$$

Temperatura maxi : $\theta_{max} = 995,55 \text{ }^\circ\text{C}$

Fase de decrecimiento :

Temperatura :

$$\theta_g = \theta_{max} - 625(t^* - t^*_{max,x}) \text{ si } t^*_{max} \leq 0,5h$$

$$\theta_g = \theta_{max} - 250(3 - t^*_{max,x})(t^* - t^*_{max,x}) \text{ si } 0,5 \leq t^*_{max} \leq 2h$$

$$\theta_g = \theta_{max} - 250(t^* - t^*_{max,x}) \text{ si } t^*_{max} \geq 2h$$

donde $t^* = t \cdot \Gamma$

$$t^*_{max} = (0,2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d} / O) \cdot \Gamma$$

$$x = 1 \text{ si } t_{max} \geq t_{lim} \text{ o } x = t_{lim} \cdot \Gamma / t^*_{max} \text{ si } t_{max} = t_{lim}$$

velocidad de decrecimiento $V_d = -506,728 \text{ }^\circ\text{C/h}$

Tiempo para llegar a 20°C : $t_d = 1,925 \text{ h}$

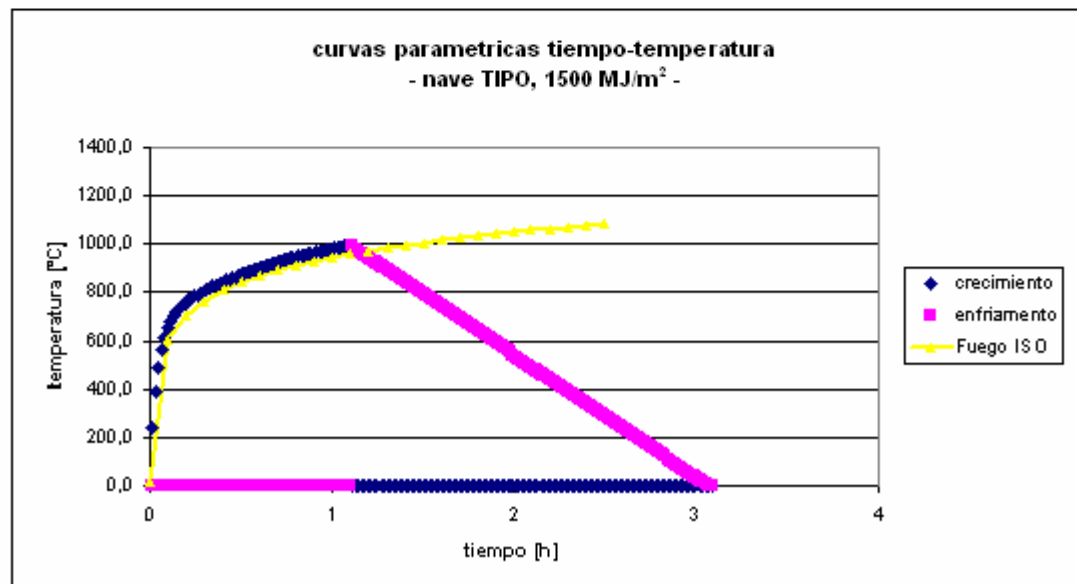
Tiempo total del incendio : $T_{total} = 3,0 \text{ h}$
 $181,9 \text{ min}$



t*	t	θg	θg	θg	t*	t	θg	θg	θg
0,02	0,02	238,9			1,65	1,30		897,2	897,2
0,04	0,03	388,6			1,68	1,32		888,7	888,7
0,06	0,05	491,9			1,70	1,33		880,3	880,3
0,08	0,07	564,2			1,72	1,35		871,8	871,8
0,11	0,08	615,7			1,74	1,37		863,4	863,4
0,13	0,10	653,1			1,76	1,38		854,9	854,9
0,15	0,12	681,1			1,78	1,40		846,5	846,5
0,17	0,13	702,6			1,80	1,42		838,1	838,1
0,19	0,15	719,8			1,82	1,43		829,6	829,6
0,21	0,17	734,0			1,85	1,45		821,2	821,2
0,23	0,18	746,1			1,87	1,47		812,7	812,7
0,25	0,20	756,7			1,89	1,48		804,3	804,3
0,28	0,22	766,3			1,91	1,50		795,8	795,8
0,30	0,23	775,1			1,93	1,52		787,4	787,4
0,32	0,25	783,3			1,95	1,53		778,9	778,9
0,34	0,27	791,1			1,97	1,55		770,5	770,5
0,36	0,28	798,5			1,99	1,57		762,0	762,0
0,38	0,30	805,6			2,02	1,58		753,6	753,6
0,40	0,32	812,4			2,04	1,60		745,2	745,2
0,42	0,33	819,0			2,06	1,62		736,7	736,7
0,45	0,35	825,4			2,08	1,63		728,3	728,3
0,47	0,37	831,6			2,10	1,65		719,8	719,8
0,49	0,38	837,6			2,12	1,67		711,4	711,4
0,51	0,40	843,5			2,14	1,68		702,9	702,9
0,53	0,42	849,2			2,16	1,70		694,5	694,5
0,55	0,43	854,7			2,19	1,72		686,0	686,0
0,57	0,45	860,1			2,21	1,73		677,6	677,6
0,59	0,47	865,3			2,23	1,75		669,1	669,1
0,62	0,48	870,4			2,25	1,77		660,7	660,7
0,64	0,50	875,4			2,27	1,78		652,3	652,3
0,66	0,52	880,2			2,29	1,80		643,8	643,8
0,68	0,53	885,0			2,31	1,82		635,4	635,4
0,70	0,55	889,6			2,33	1,83		626,9	626,9
0,72	0,57	894,1			2,35	1,85		618,5	618,5
0,74	0,58	898,5			2,38	1,87		610,0	610,0
0,76	0,60	902,7			2,40	1,88		601,6	601,6
0,78	0,62	906,9			2,42	1,90		593,1	593,1
0,81	0,63	911,0			2,44	1,92		584,7	584,7
0,83	0,65	915,0			2,46	1,93		576,2	576,2
0,85	0,67	918,8			2,48	1,95		567,8	567,8
0,87	0,68	922,6			2,50	1,97		559,4	559,4
0,89	0,70	926,3			2,52	1,98		550,9	550,9
0,91	0,72	930,0			2,55	2,00		542,5	542,5
0,93	0,73	933,5			2,57	2,02		534,0	534,0
0,95	0,75	937,0			2,59	2,03		525,6	525,6
0,98	0,77	940,4			2,61	2,05		517,1	517,1
1,00	0,78	943,7			2,63	2,07		508,7	508,7
1,02	0,80	946,9			2,65	2,08		500,2	500,2
1,04	0,82	950,1			2,67	2,10		491,8	491,8
1,06	0,83	953,2			2,69	2,12		483,3	483,3
1,08	0,85	956,3			2,72	2,13		474,9	474,9
1,10	0,87	959,3			2,74	2,15		466,5	466,5
1,12	0,88	962,2			2,76	2,17		458,0	458,0
1,15	0,90	965,1			2,78	2,18		449,6	449,6
1,17	0,92	967,9			2,80	2,20		441,1	441,1
1,19	0,93	970,6			2,82	2,22		432,7	432,7
1,21	0,95	973,3			2,84	2,23		424,2	424,2
1,23	0,97	976,0			2,86	2,25		415,8	415,8
1,25	0,98	978,6			2,89	2,27		407,3	407,3
1,27	1,00	981,1			2,91	2,28		398,9	398,9
1,29	1,02	983,7			2,93	2,30		390,4	390,4
1,32	1,03	986,1			2,95	2,32		382,0	382,0
1,34	1,05	988,5			2,97	2,33		373,6	373,6
1,36	1,07	990,9			2,99	2,35		365,1	365,1
1,38	1,08	993,3			3,01	2,37		356,7	356,7
1,40	1,10	995,5			3,03	2,38		348,2	348,2
1,42	1,12		990,1	990,1	3,06	2,40		339,8	339,8
1,44	1,13		981,6	981,6	3,08	2,42		331,3	331,3
1,46	1,15		973,2	973,2	3,10	2,43		322,9	322,9
1,49	1,17		964,7	964,7	3,12	2,45		314,4	314,4
1,51	1,18		956,3	956,3	3,14	2,47		306,0	306,0
1,53	1,20		947,8	947,8	3,16	2,48		297,5	297,5
1,55	1,22		939,4	939,4	3,18	2,50		289,1	289,1
1,57	1,23		931,0	931,0	3,20	2,52		280,7	280,7
1,59	1,25		922,5	922,5	3,22	2,53		272,2	272,2
1,61	1,27		914,1	914,1	3,25	2,55		263,8	263,8
1,63	1,28		905,6	905,6	3,27	2,57		255,3	255,3



t*	t	θg	θg	θg	t*	t	θg	θg	θg
3,29	2,58		246,9	246,9	0,02	0,02	238,9		
3,31	2,60		238,4	238,4	0,04	0,03	388,6		
3,33	2,62		230,0	230,0	0,06	0,05	491,9		
3,35	2,63		221,5	221,5	0,08	0,07	564,2		
3,37	2,65		213,1	213,1	0,11	0,08	615,7		
3,39	2,67		204,6	204,6	0,13	0,10	653,1		
3,42	2,68		196,2	196,2	0,15	0,12	681,1		
3,44	2,70		187,8	187,8	0,17	0,13	702,6		
3,46	2,72		179,3	179,3	0,19	0,15	719,8		
3,48	2,73		170,9	170,9	0,21	0,17	734,0		
3,50	2,75		162,4	162,4	0,23	0,18	746,1		
3,52	2,77		154,0	154,0	0,25	0,20	756,7		
3,54	2,78		146,5	146,5	0,28	0,22	766,3		
3,56	2,80		137,1	137,1	0,30	0,23	775,1		
3,59	2,82		128,6	128,6	0,32	0,25	783,3		
3,61	2,83		120,2	120,2	0,34	0,27	791,1		
3,63	2,85		111,7	111,7	0,36	0,28	798,5		
3,65	2,87		103,3	103,3	0,38	0,30	805,6		
3,67	2,88		94,9	94,9	0,40	0,32	812,4		
3,69	2,90		86,4	86,4	0,42	0,33	819,0		
3,71	2,92		78,0	78,0	0,45	0,35	825,4		
3,73	2,93		69,5	69,5	0,47	0,37	831,6		
3,76	2,95		61,1	61,1	0,49	0,38	837,6		
3,78	2,97		52,6	52,6	0,51	0,40	843,5		
3,80	2,98		44,2	44,2	0,53	0,42	849,2		
3,82	3,00		35,7	35,7	0,55	0,43	854,7		
3,84	3,02		27,3	27,3	0,57	0,45	860,1		
3,86	3,03		18,8	18,8	0,59	0,47	865,3		
3,88	3,05		10,4	10,4	0,62	0,48	870,4		
3,90	3,07		2,0	2,0	0,64	0,50	875,4		
3,92	3,08				0,66	0,52	880,2		



Anexo B

Informes de simulaciones Ozone V2

Para cada simulación, el programa Ozone propone la opción de imprimir un informe con los principales datos y resultados. En este anexo se presenta el informe del escenario ESCC3 con un $RHR_{\max i}$ de 3000kW/m^2 a valor de ejemplo.

El programa Ozone permite también de recuperar algunos resultados como el área de fuego, la masa de oxígeno, la velocidad de pirolisis y la presión al nivel del suelo. Estos resultados son presentados para este mismo escenario después del informe.

El informe incluye unos resultados sobre el calentamiento de la estructura. Dado que este no entra en el objetivo principal del proyecto, ningún dato específico a la nave TIPO fue entrado y los resultados obtenidos no son significantes.



OZone V 2.2.2 Report

Analysis Name:
 File Name: C:\Archivos de programa\OZone V2.2\ESCC3.ozn
 Created: 27/09/2006 at 12:46:04

ANALYSIS STRATEGY

Selected strategy: Combination 2Zones - 1 Zone Model
 Transition criteria from 2 Zones to 1 Zone
 Upper Layer Temperature $\geq 500^{\circ}\text{C}$
 Combustible in Upper Layer + U.L. Temperature \geq Combustible Ignition Temperature = 300°C
 Interface Height $\leq 0,2$ Compartment Height
 Fire Area $\geq 0,5$ Floor Area

PARAMETERS

Openings

Radiation Through Closed Openings: 0,8
 Bernoulli Coefficient: 0,7

Physical Characteristics of Compartment

Initial Temperature: 293 K
 Initial Pressure: 100000 Pa

Parameters of Wall Material

Convection Coefficient at the Hot Surface: 25 W/m²K
 Convection Coefficient at the Cold Surface: 9 W/m²K

Calculation Parameters

End of Calculation: 7200 sec
 Time Step for Printing Results: 15 sec
 Maximum Time Step for Calculation: 5 sec

Air Entrained Model: Heskestad

Temperature Dependent Openings

All openings activated at: 300 °C

Stepwise Variation

Temperature [°C]	% of Total Openings [%]
20	1
150	100
500	100

Linear Variation

Temperature [°C]	% of Total Openings [%]
20	10
400	50
500	100

Time Dependent Openings

Time [sec]	% of Total Openings [%]
0	1
500	100

COMPARTMENT

Form of Compartment: Rectangular Floor
 Height: 9,5 m
 Depth: 10,2 m
 Length: 15,2 m
 Roof Type: Flat Roof

DEFINITION OF ENCLOSURE BOUNDARIES

Floor



Material (from inside to outside)	Thickness [cm]	Unit Mass [kg/m ²]	Conductivity [W/mK]	Specific Heat [J/kgK]
Normal weight Concrete [EN1994-1-2]	20	2300	1,6	1000

Ceiling

Material (from inside to outside)	Thickness [cm]	Unit Mass [kg/m ²]	Conductivity [W/mK]	Specific Heat [J/kgK]
Alu standard	0,5	2700	200	940

Horizontal Openings

	Group 1	Group 2	Group 3
Diameter	1,03 m	2,88 m	
Nb of Openings	1	2	
Variation	Stepwise	Stepwise	

Wall 1

Material (from inside to outside)	Thickness [cm]	Unit Mass [kg/m ²]	Conductivity [W/mK]	Specific Heat [J/kgK]
Middle weight Concrete [EN12524]	18	1800	1,15	1000

Openings

Sill Height [m]	Soffit Height [m]	Width [m]	Variation	Adiabatic
6	7,7	4	Temp Dependent	no
0	4	4	Time Dependent	no

Wall 2

Material (from inside to outside)	Thickness [cm]	Unit Mass [kg/m ²]	Conductivity [W/mK]	Specific Heat [J/kgK]
Middle weight Concrete [EN12524]	18	1800	1,15	1000

Wall 3

Material (from inside to outside)	Thickness [cm]	Unit Mass [kg/m ²]	Conductivity [W/mK]	Specific Heat [J/kgK]
Middle weight Concrete [EN12524]	18	1800	1,15	1000

Wall 4

Material (from inside to outside)	Thickness [cm]	Unit Mass [kg/m ²]	Conductivity [W/mK]	Specific Heat [J/kgK]
Middle weight Concrete [EN12524]	18	1800	1,15	1000

FIRE

Fire Curve:	NFSC Design Fire
Maximum Fire Area:	35 m ²
Fire Elevation:	0 m
Fuel Height:	5 m

Occupancy	Fire Growth Rate	RHRf [kW/m ²]	Fire Load qf,k [MJ/m ²]	Danger of Fire Activation
User Defined	150	3000	5800	1

Active Measures

Description	Active	Value
Automatic Water Extinguishing System	No	$\gamma_{n,1} = 1$
Independent Water Supplies	No	$\gamma_{n,2} = 1$
Automatic Fire Detection by Heat	No	$\gamma_{n,3} = 1$
Automatic Fire Detection by Smoke	No	
Automatic Alarm Transmission to Fire Brigade	No	$\gamma_{n,5} = 1$
Work Fire Brigade	No	$\gamma_{n,6} = 1$
Off Site Fire Brigade	No	
Safe Access Routes	Yes	$\gamma_{n,8} = 1$
Staircases Under Overpressure in Fire Alarm	No	
Fire Fighting Devices	Yes	$\gamma_{n,9} = 1$
Smoke Exhaust System	Yes	$\gamma_{n,10} = 1$



Fire Risk Area:	35	m ²	$\gamma_{q,1} = 1,18$
Danger of Fire Activation:			$\gamma_{q,2} = 1$
$q_{f,d}$	5475,2	MJ/m ²	
Combustion Heat of Fuel:	17,5	MJ/kg	
Combustion Efficiency Factor:	0,8		
Combustion Model:	Extended fire duration		

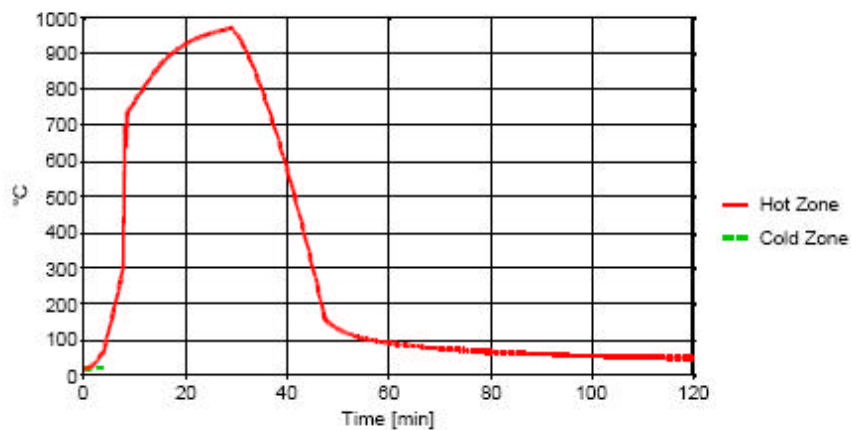
RESULTS

Fire Area: The maximum fire area (35.00m²) is lower than 25% of the floor area (155.04m²). The fire load is localised.

All fire load is burning ($A_{fi} = A_{fi,max}$): Temperature of zone in contact with fuel >300.0°C at time [s] 467.07

Switch to one zone: Lower layer Height < 20.0% oocompartment height at time [s] 211.49

Gas Temperature



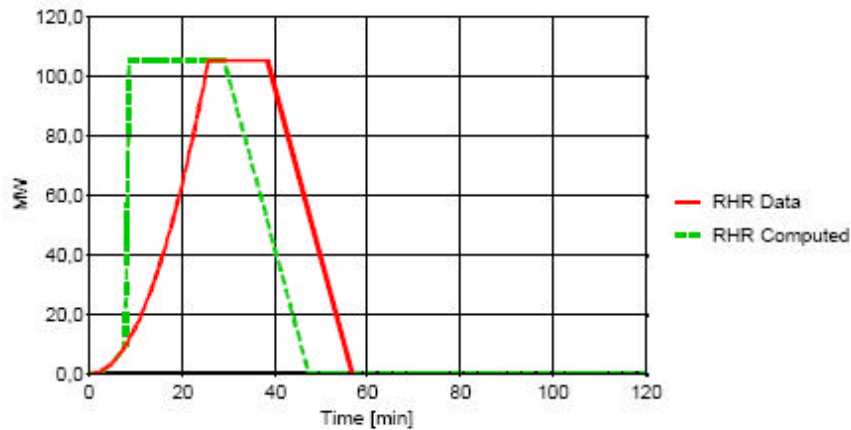
Analysis Name:

Peak: 971 °C

At: 29 min

Figure 1. Hot and Cold Zone Temperature

Rate of Heat Release



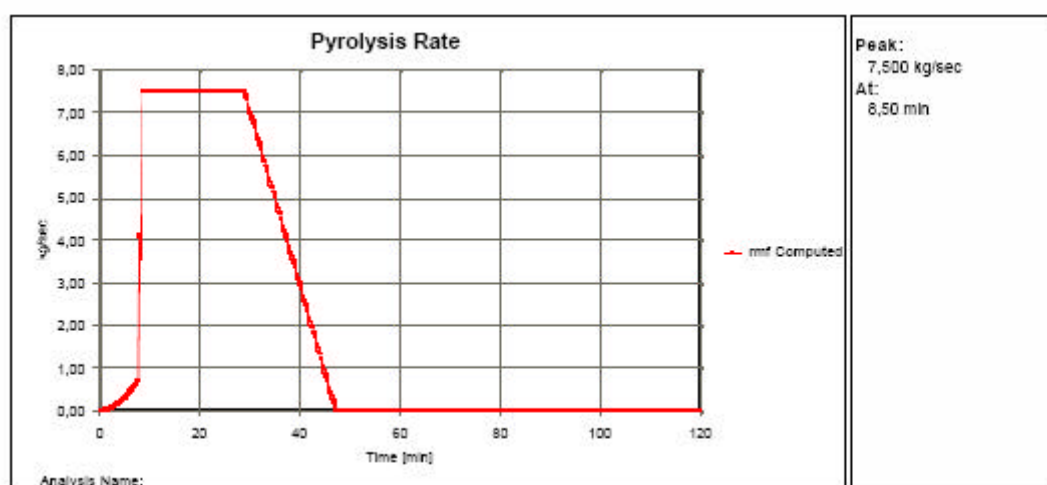
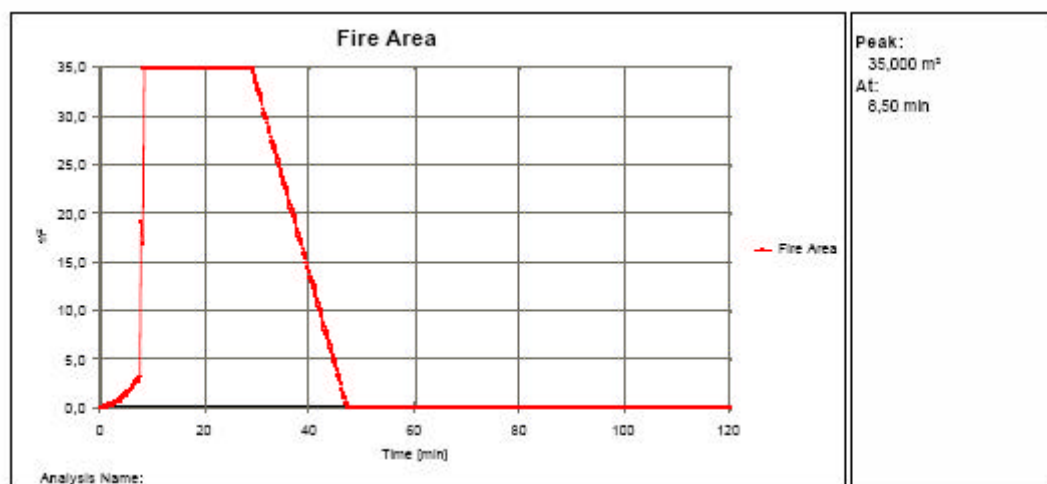
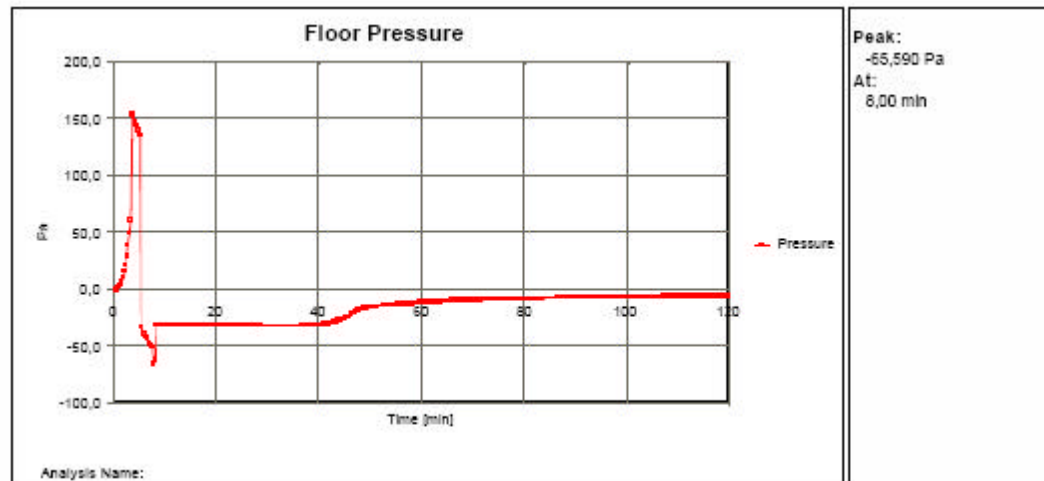
Analysis Name:

Peak: 105,00 MW

At: 25,8 min

Figure 2. RHR Data and Computed





Anexo C

Archivos FDS .Data y . Out

Este anexo presenta el archivo .data del escenario ESCC3 que permite la simulación con FDS. Despues se presenta un extracto del archivo .Out que informa el usuario del desarrollo de la simulación.



ESCC3-3000.data

```

                                ESCC3-3000
&HEAD CHID='ESCC3-3000',TITLE='ESCC3-3000' / All output files will have names
beginning with "nido4"

&GRID IBAR=50,JBAR=36,KBAR=32 / Specify number of grid cells in the x, y, and z
directions, respectively
&PDIM XBAR=15.2,YBAR=10.2,ZBAR=9.6 / Specify the coordinates of the
computational domain
      XBAR, YBAR, and ZBAR indicate the maximum x, y, and z values.

&MISC REACTION='PROPANE' /

&TIME TWFIN=3000 / Time when finished (length of simulation)

&REAC ID='PROPANE'
      FYI='Propane, C_3 H_8'
      MW_FUEL=44
      NU_O2=5.
      NU_CO2=3.
      NU_H2O=4.
      SOOT_YIELD=0.01 /

&SURF ID   = 'CONCRETE'
      FYI   = 'EN12524'
      C_P   = 1
      DENSITY=1800.
      KS    = 1.15
      DELTA = 0.18 /

&SURF ID   = 'Alu'
      FYI   = 'EN12524'
      C_P   = 0.94
      DENSITY=2700.
      KS    = 200
      DELTA = 0.05 /

&SURF ID   = 'panelroc'
      C_P   = 1
      DENSITY=175.
      KS    = 0.041
      DELTA = 0.075 /

&VENT XB= 4, 11, 2.6, 7.6, 0, 0, SURF_ID='BURNER',T_DEACTIVATE=3000, //
&SURF ID='BURNER', HRRPUA=3000, TMPWAL=900.,RAMP_Q='BURN_UP',//
&RAMP ID='BURN_UP', T=0.0, F=0/
&RAMP ID='BURN_UP', T=150.0, F=0.01/
&RAMP ID='BURN_UP', T=300, F=0.04/
&RAMP ID='BURN_UP', T=390, F=0.06/
&RAMP ID='BURN_UP', T=480, F=0.55/
&RAMP ID='BURN_UP', T=510, F=1/
&RAMP ID='BURN_UP', T=1740, F=1/
&RAMP ID='BURN_UP', T=2865, F=0/

&OBST XB= 0, 0.2, 9.54, 10.16, 0, 9.51, RGB=0.7,0.7,0.7,SURF_ID='CONCRETE' /
hormigon 1
&OBST XB= 0, 0.2, 4.79, 9.54, 0, 2.46, RGB=0.7,0.7,0.7,SURF_ID='CONCRETE' /
hormigon 2
&OBST XB= 0, 0.2, 0, 0.62, 0, 9.51, RGB=0.7,0.7,0.7,SURF_ID='CONCRETE' /
hormigon 3

&OBST XB= 0, 0.2, 4.79, 9.54, 2.46, 9.51, RGB=0.5,0.5,0.5,SURF_ID='CONCRETE' /
poliuretano 1
&OBST XB= 0, 0.2, 0.62, 4.79, 4.0, 9.51, RGB=0.5,0.5,0.5,SURF_ID='CONCRETE' /
poliuretano 2

```



ESCC3-3000

```

&OBST XB= 0.188, 15.146, 0, 0.188, 0, 9.51, RGB=0.7,0.7,0.7,0.5,
SURF_ID='CONCRETE' / hormigon 6
&OBST XB= 15.0, 15.24, 0.188, 9.972, 0, 9.51, RGB=0.7,0.7,0.7,
SURF_ID='CONCRETE' / hormigon 7
&OBST XB= 0.188, 15.146, 9.972, 10.16, 0, 9.51, RGB=0.7,0.7,0.7,
SURF_ID='CONCRETE' / hormigon 8

&OBST XB= 0.2, 6.04, 0.188, 9.972, 4.86, 5.06, RGB=1,1,0, SURF_ID='CONCRETE' /
altillo
&HOLE XB= 1.94, 4.46, 9.972, 8.972, 4.86, 5.06, /abujero altillo

&OBST XB= 1.94, 0.188, 9.972, 7.972, 2.41, 2.52, RGB=1,1,0, SURF_ID='CONCRETE' /
plataforma escalera

&OBST XB= 6.04, 5.74, 0.188, 9.972, 5.16, 4.52, RGB=1,0,0, / viga altillo
&OBST XB= 0.08, 5.74, 5.08, 5.2, 4.86, 4.61, RGB=1,0,0, / viga altillo

&OBST XB= 0, 15.146, 1, 9.2, 9.41, 9.6, RGB=0.9,0.9,0.9,0.7, SURF_ID='Alu' /
techo

&OBST XB= 0, 15.146, 0, 1, 9.41, 9.6, RGB=0.9,0.9,0.9,0.7, SURF_ID='panelroc' /
placas
&OBST XB= 0, 15.146, 9.20, 10.2, 9.41, 9.6, RGB=0.9,0.9,0.9,0.7,
SURF_ID='panelroc' / placas

&HOLE XB= 11, 12.6, 4.63, 5.53, 9.41, 9.6, / Colt
&VENT XB= 11, 12.6, 4.63, 5.53, 9.6, 9.6, SURF_ID=OPEN, HEAT_ACTIVATE='det1', /
&HEAT XYZ= 13.0, 5.15, 9.4, RTI=10.0, ACTIVATION_TEMPERATURE=72.0, LABEL='det1'

&HOLE XB= 0, 0.2, 0.88, 2.79, 6.1, 7.75, /ventana1
&HOLE XB= 0, 0.2, 2.99, 4.9, 6.1, 7.75, /ventana2
&VENT XB= 0, 0.0, 0.88, 2.79, 6.1, 7.75, SURF_ID='OPEN', HEAT_ACTIVATE='det2',
/vent ventana 1
&VENT XB= 0, 0.0, 2.99, 4.9, 6.1, 7.75, SURF_ID='OPEN', HEAT_ACTIVATE='det2' /
vent ventana 2
&HEAT XYZ= 0.2, 2.7, 6.8, RTI=10.0, ACTIVATION_TEMPERATURE=300.0, LABEL='det2'

&HOLE XB= 4, 11, 2.5, 3.5, 9.41, 9.6, / panel polyester1
&VENT XB= 4, 11, 2.5, 3.5, 9.6, 9.6, SURF_ID=OPEN, HEAT_ACTIVATE='det3', /
&HOLE XB= 4, 11, 6.7, 7.6, 9.41, 9.6, / panel polyester2
&VENT XB= 4, 11, 6.7, 7.6, 9.6, 9.6, SURF_ID=OPEN, HEAT_ACTIVATE='det3', /
&HEAT XYZ= 7.5, 5.15, 9.4, RTI=30.0, ACTIVATION_TEMPERATURE=150.0, LABEL='det3'

&VENT XB= 0, 0.0, 0.62, 4.79, 0, 4, SURF_ID='OPEN', T_ACTIVATE=500 / vent puerta
&HEAT XYZ= 0.2, 2.6, 2, RTI=10.0, ACTIVATION_TEMPERATURE=300.0, LABEL='det4'

&SLCF PBX=5.10, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=9.5, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=0.5, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBZ=0.9, QUANTITY='W-VELOCITY', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=0.0, QUANTITY='U-VELOCITY', VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBZ=9.2, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=7.5, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /

&BNDF QUANTITY='GAUGE_HEAT_FLUX', DTSAM=60 /
&BNDF QUANTITY='CONVECTIVE_FLUX', DTSAM=60 /
&BNDF QUANTITY='WALL_TEMPERATURE', DTSAM=60 /

```



```
                                ESCC3-3000
&THCP XYZ=7.5,5,8,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='temp 8m', DTSAM=60/
&THCP XYZ=7.5,5,8,QUANTITY='UPPER TEMPERATURE',LABEL='hot zone', DTSAM=60/
&THCP XYZ=7.5,5,8,QUANTITY='LAYER HEIGHT',LABEL='hot zone', DTSAM=60/

&THCP XYZ=2.5,2.5,9,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='a1', DTSAM=60/
&THCP XYZ=7.5,2.5,9,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='a2', DTSAM=60/
&THCP XYZ=12.5,2.5,9,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='a3', DTSAM=60/
&THCP XYZ=2.5,7.5,9,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='a4', DTSAM=60/
&THCP XYZ=7.5,7.5,9,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='a5', DTSAM=60/
&THCP XYZ=12.5,7.5,9,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='a6', DTSAM=60/
&THCP XYZ=4.5,2.5,4.3,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='alt1', DTSAM=60/
&THCP XYZ=4.5,7.5,4.3,QUANTITY='TEMPERATURE',LABEL='alt4', DTSAM=60/
```



Extracto de ESCC3-3000.out

Nota : la versión original completa de este archivo cuenta 278 paginas.

```

                                ESCC3-3000

NIST Fire Dynamics Simulator
Compilation Date: March 10, 2006
Version Number : 4.07

Job TITLE      : ESCC3-3000
Job ID string: ESCC3-3000

Grid Dimensions, Mesh 1
  Cells in the X Direction      50
  Cells in the Y Direction      36
  Cells in the Z Direction      32

Physical Dimensions, Mesh 1
  Length (m)                    15.200
  Width (m)                     10.200
  Height (m)                    9.600
  Initial Time Step (s)         0.151

Miscellaneous Parameters
  Simulation Time (s)            3000.000
  LES Calculation
  Smagorinsky Constant (LES)    0.20
  Turb. Prandtl Number           0.50
  Turb. Schmidt Number           0.50
  Ambient Temperature (C)        20.00

Mixture Fraction State Relationships
  Molecular Weight, Fuel (g/mol) 44.00
  Stoich. Coeff., Fuel           1.00
  Stoich. Coeff., Oxygen          4.96
  Stoich. Coeff., CO_2            2.96
  Stoich. Coeff., H2O             4.00
  Soot Yield                      0.010
  CO Yield                        0.005
  Stoichiometric Value of Z       0.060
  Heat of Combustion (kJ/kg)      47251.

Surface Conditions
  0 INERT (DEFAULT)
    Wall or Vent Temperature (C) 20.0

  1 CONCRETE
    Thermally Thick Material
    Thickness (m)                 0.180
    Density (kg/m3)               1.80E+03
    Specific Heat (kJ/kg/K)       1.00E+00
    Conductivity (W/m K)          1.1500
    Ignition Temperature (C)      5000.0
    Nodes:
      0 0.00000
      1 0.00010
      2 0.00024
      3 0.00043
      4 0.00070
      5 0.00107
      6 0.00158
      7 0.00230

```

Página 1



```

                                ESCC3-3000
      8  0.00329
      9  0.00466
     10  0.00656
     11  0.00921
     12  0.01287
     13  0.01796
     14  0.02502
     15  0.03481
     16  0.04839
     17  0.06724
     18  0.09339
     19  0.12967
     20  0.18000
Backing to void

2 Alu
Thermally Thick Material
Thickness (m)                0.050
Density (kg/m3)              2.70E+03
Specific Heat (kJ/kg/K)      9.40E-01
Conductivity (W/m K)         200.0000
Ignition Temperature (C)     5000.0
Nodes:
      0  0.00000
      1  0.00010
      2  0.00023
      3  0.00039
      4  0.00060
      5  0.00087
      6  0.00122
      7  0.00166
      8  0.00222
      9  0.00295
     10  0.00388
     11  0.00507
     12  0.00659
     13  0.00854
     14  0.01104
     15  0.01424
     16  0.01835
     17  0.02360
     18  0.03033
     19  0.03896
     20  0.05000
Backing to void

3 panelroc
Thermally Thick Material
Thickness (m)                0.075
Density (kg/m3)              1.75E+02
Specific Heat (kJ/kg/K)      1.00E+00
Conductivity (W/m K)         0.0410
Ignition Temperature (C)     5000.0
Nodes:
      0  0.00000
      1  0.00010
      2  0.00023
      3  0.00040
      4  0.00063
      5  0.00093
      6  0.00132
      7  0.00184
      8  0.00252
      9  0.00341
     10  0.00458
     11  0.00612
     12  0.00814
     13  0.01080
     14  0.01429

```



ESCC3-3000

15	0.01888
16	0.02492
17	0.03285
18	0.04328
19	0.05699
20	0.07500

Backing to void

4 BURNER
Wall or Vent Temperature (C) 900.0
HRR Per Unit Area (kW/m2) 3000.

5 OPEN
Passive Vent to Atmosphere

6 MIRROR
Symmetry Plane

Obstruction Information, Mesh 1

1 Nodes:	0	1	34	36	0	32,	Surface IDs:	1	1	1	1	1	1
2 Nodes:	0	1	17	34	0	8,	Surface IDs:	1	1	1	1	1	1
3 Nodes:	0	1	0	2	0	32,	Surface IDs:	1	1	1	1	1	1
4 Nodes:	0	1	17	34	8	32,	Surface IDs:	1	1	1	1	1	1
5 Nodes:	0	1	3	10	26	32,	Surface IDs:	1	1	1	1	1	1
6 Nodes:	1	50	0	1	0	32,	Surface IDs:	1	1	1	1	1	1
7 Nodes:	49	50	1	35	0	32,	Surface IDs:	1	1	1	1	1	1
8 Nodes:	1	50	35	36	0	32,	Surface IDs:	1	1	1	1	1	1
9 Nodes:	6	15	1	32	16	17,	Surface IDs:	1	1	1	1	1	1
10 Nodes:	1	6	28	35	8	8,	Surface IDs:	1	1	1	1	1	1
11 Nodes:	19	20	1	35	15	17,	Surface IDs:	0	0	0	0	0	0
12 Nodes:	0	19	18	18	15	16,	Surface IDs:	0	0	0	0	0	0
13 Nodes:	36	41	20	32	31	32,	Surface IDs:	2	2	2	2	2	2
14 Nodes:	0	50	0	4	31	32,	Surface IDs:	3	3	3	3	3	3
15 Nodes:	0	50	32	36	31	32,	Surface IDs:	3	3	3	3	3	3
16 Nodes:	1	6	1	35	16	17,	Surface IDs:	1	1	1	1	1	1
17 Nodes:	15	20	1	35	16	17,	Surface IDs:	1	1	1	1	1	1
18 Nodes:	13	36	27	32	31	32,	Surface IDs:	2	2	2	2	2	2
19 Nodes:	41	50	4	32	31	32,	Surface IDs:	2	2	2	2	2	2
20 Nodes:	36	41	4	16	31	32,	Surface IDs:	2	2	2	2	2	2
21 Nodes:	0	1	2	3	13	32,	Surface IDs:	1	1	1	1	1	1
22 Nodes:	0	1	11	17	26	32,	Surface IDs:	1	1	1	1	1	1
23 Nodes:	0	1	3	10	13	20,	Surface IDs:	1	1	1	1	1	1
24 Nodes:	0	1	10	11	13	32,	Surface IDs:	1	1	1	1	1	1
25 Nodes:	0	1	11	17	13	20,	Surface IDs:	1	1	1	1	1	1
26 Nodes:	0	13	4	32	31	32,	Surface IDs:	2	2	2	2	2	2
27 Nodes:	13	36	4	9	31	32,	Surface IDs:	2	2	2	2	2	2
28 Nodes:	13	36	12	24	31	32,	Surface IDs:	2	2	2	2	2	2

Vent Information, Mesh 1

1 Nodes:	13	36	9	27	0	0,	Surface ID: 4
2 Nodes:	36	41	16	20	32	32,	Surface ID: 5
3 Nodes:	0	0	3	10	20	26,	Surface ID: 5
4 Nodes:	0	0	11	17	20	26,	Surface ID: 5
5 Nodes:	13	36	9	12	32	32,	Surface ID: 5
6 Nodes:	13	36	24	27	32	32,	Surface ID: 5
7 Nodes:	0	0	2	17	0	13,	Surface ID: 5

Heat Detector Information

1 Coords:	13.0	5.2	9.4,	RTI (ms) ^{1.5} :	10.,	ACTIVATION_TEMPERATURE
(C): 72., Label:	det1					
2 Coords:	0.2	2.7	6.8,	RTI (ms) ^{1.5} :	10.,	ACTIVATION_TEMPERATURE
(C): 300., Label:	det2					
3 Coords:	7.5	5.2	9.4,	RTI (ms) ^{1.5} :	30.,	ACTIVATION_TEMPERATURE




```

                                ESCC3-3000
(C): 150., Label: det3
  4 Coords: 0.2 2.6 2.0, RTI (ms)^.5: 10., ACTIVATION_TEMPERATURE
(C): 300., Label: det4

PLOT3D Information
  Sampling Interval (s)          600.000
  1 Quantity: TEMPERATURE
  2 Quantity: U-VELOCITY
  3 Quantity: V-VELOCITY
  4 Quantity: W-VELOCITY
  5 Quantity: HRRPUV

Thermocouple Information
  Sampling Interval (s)          60.000
  1 Coords: 7.500 5.000 8.000, Quantity: TEMPERATURE, Label: temp 8m
  2 Coords: 7.500 5.000 8.000, Quantity: UPPER TEMPERATURE, Label: hot
zone
  3 Coords: 7.500 5.000 8.000, Quantity: LAYER HEIGHT, Label: hot zone
  4 Coords: 2.500 2.500 9.000, Quantity: TEMPERATURE, Label: a1
  5 Coords: 7.500 2.500 9.000, Quantity: TEMPERATURE, Label: a2
  6 Coords: 12.500 2.500 9.000, Quantity: TEMPERATURE, Label: a3
  7 Coords: 2.500 7.500 9.000, Quantity: TEMPERATURE, Label: a4
  8 Coords: 7.500 7.500 9.000, Quantity: TEMPERATURE, Label: a5
  9 Coords: 12.500 7.500 9.000, Quantity: TEMPERATURE, Label: a6
  10 Coords: 4.500 2.500 4.300, Quantity: TEMPERATURE, Label: alt1
  11 Coords: 4.500 7.500 4.300, Quantity: TEMPERATURE, Label: alt4

Isosurface File Information
  Sampling Interval (s)          3.000
  1 Quantity: MIXTURE_FRACTION    VALUE(S): 0.060
  2 Quantity: HRRPUV              VALUE(S): 93.985

Slice File Information, Mesh 1
  Sampling Interval (s)          3.000
  1 Nodes: 0 50 18 18 0 32, Quantity: TEMPERATURE
  2 Nodes: 0 50 18 18 0 32, Quantity: U-VELOCITY
  3 Nodes: 0 50 18 18 0 32, Quantity: V-VELOCITY
  4 Nodes: 0 50 18 18 0 32, Quantity: W-VELOCITY
  5 Nodes: 0 50 34 34 0 32, Quantity: TEMPERATURE
  6 Nodes: 0 50 34 34 0 32, Quantity: U-VELOCITY
  7 Nodes: 0 50 34 34 0 32, Quantity: V-VELOCITY
  8 Nodes: 0 50 34 34 0 32, Quantity: W-VELOCITY
  9 Nodes: 0 50 2 2 0 32, Quantity: TEMPERATURE
  10 Nodes: 0 50 2 2 0 32, Quantity: U-VELOCITY
  11 Nodes: 0 50 2 2 0 32, Quantity: V-VELOCITY
  12 Nodes: 0 50 2 2 0 32, Quantity: W-VELOCITY
  13 Nodes: 0 50 0 36 3 3, Quantity: W-VELOCITY
  14 Nodes: 0 50 0 36 3 3, Quantity: U-VELOCITY
  15 Nodes: 0 50 0 36 3 3, Quantity: V-VELOCITY
  16 Nodes: 0 50 0 36 3 3, Quantity: W-VELOCITY
  17 Nodes: 0 0 0 36 0 32, Quantity: U-VELOCITY
  18 Nodes: 0 0 0 36 0 32, Quantity: U-VELOCITY
  19 Nodes: 0 0 0 36 0 32, Quantity: V-VELOCITY
  20 Nodes: 0 0 0 36 0 32, Quantity: W-VELOCITY
  21 Nodes: 0 50 0 36 31 31, Quantity: TEMPERATURE
  22 Nodes: 0 50 0 36 31 31, Quantity: U-VELOCITY
  23 Nodes: 0 50 0 36 31 31, Quantity: V-VELOCITY

```



```

                                ESCC3-3000
24 Nodes:  0 50  0 36 31 31, Quantity: W-VELOCITY
25 Nodes: 25 25  0 36  0 32, Quantity: TEMPERATURE
26 Nodes: 25 25  0 36  0 32, Quantity: U-VELOCITY
27 Nodes: 25 25  0 36  0 32, Quantity: V-VELOCITY
28 Nodes: 25 25  0 36  0 32, Quantity: W-VELOCITY

```

Boundary File Information

Sampling Interval (s) 60.000

1 Quantity: GAUGE_HEAT_FLUX
 2 Quantity: CONVECTIVE_FLUX
 3 Quantity: WALL_TEMPERATURE

Radiation Model Information

Radiative heat flux fully updated in 15 time steps

Number of control angles 104

Theta band N_phi Solid angle

```

1:  4 0.12
2: 12 0.11
3: 16 0.13
4: 20 0.12
5: 20 0.12
6: 16 0.13
7: 12 0.11
8:  4 0.12

```

Using gray gas absorption.

Mean beam length is 1.343 m

Run Time Diagnostics

Iteration 1 September 21, 2006 11:47:47

```

-----
CPU/step: 1.188 s, Total CPU: 1.19 s
Time step: 0.15087 s, Total time: 0.15 s
Max CFL number: 0.10E-01 at ( 7, 26, 29)
Max divergence: 0.72E-04 at ( 28, 21, 1)
Min divergence: -.60E-06 at ( 19, 10, 5)
Total Heat Release Rate: 0.420 kW
Radiation Loss to Boundaries: 0.147 kW

```

Iteration 2 September 21, 2006 11:47:48

```

-----
CPU/step: 0.281 s, Total CPU: 1.47 s
Time step: 0.15087 s, Total time: 0.30 s
Max CFL number: 0.10E-01 at ( 7, 26, 29)
Max divergence: 0.13E-03 at ( 22, 23, 1)
Min divergence: -.11E-05 at ( 28, 9, 2)
Total Heat Release Rate: 0.756 kW
Radiation Loss to Boundaries: 0.265 kW

```

Iteration 3 September 21, 2006 11:47:48

```

-----
CPU/step: 0.250 s, Total CPU: 1.72 s
Time step: 0.15087 s, Total time: 0.45 s
Max CFL number: 0.10E-01 at ( 7, 26, 29)
Max divergence: 0.25E-03 at ( 22, 23, 1)
Min divergence: -.21E-05 at ( 28, 9, 2)
Total Heat Release Rate: 1.445 kW
Radiation Loss to Boundaries: 0.506 kW

```

Iteration 4 September 21, 2006 11:47:48

```

-----
CPU/step: 0.453 s, Total CPU: 2.17 s

```



/////CORTE/////

```

                                ESCC3-3000
Max div. error: 0.14E-07 at ( 36, 27, 32)
Radiation Loss to Boundaries:      -1.274 kW

Iteration 168542   September 24, 2006   20:06:39
-----
CPU/step:      3.102 s, Total CPU:      78.30 hr
Time step: 0.08867 s, Total time: 3000.11 s
Max CFL number: 0.88E+00 at ( 39, 16, 31)
Max divergence: 0.13E+00 at ( 34, 13, 31)
Min divergence: -.17E+00 at ( 41, 19, 31)
Max div. error: 0.14E-07 at ( 36, 27, 32)
Radiation Loss to Boundaries:      -1.124 kW

```

CPU Time Usage, Mesh 1

	CPU s	%
MAIN	282019.19	100.00
DIVG	7725.09	2.74
MASS	12358.59	4.38
VELO	18246.58	6.47
PRES	3222.95	1.14
PART	0.00	0.00
DUMP	1949.77	0.69
SPRK	16.55	0.01
RADI	14511.41	5.15
COMB	223841.17	79.37
COMM	0.69	0.00

